

UCH-FC
MAG-EBE
P473
C-1



**VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y VEGETACIONAL A
ESCALAS DE TIEMPO MILENIAL-SUBMILENIAL
DURANTE LOS ÚLTIMOS 18.000 AÑOS EN LAGO
LEPUÉ, ISLA GRANDE DE CHILOÉ, CHILE.**

**Tesis
Entregada a la
Universidad De Chile
En Cumplimiento parcial de los requisitos
para optar al Grado de:**

**Magíster en Ciencias Biológicas con mención en
Ecología y Biología Evolutiva**

Facultad De Ciencias

Por

OSCAR HERNÁN PESCE GÓMEZ

Diciembre, 2011

Director de Tesis

Dr. Patricio Iván Moreno Moncada.

Co-Director de Tesis

Dr. Rodrigo Patricio Villa-Martínez.

FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE
INFORME DE APROBACION
TESIS DE MAGÍSTER

Se informa a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias que la tesis de Magíster presentada por el candidato

OSCAR HERNÁN PESCE GÓMEZ

Ha sido aprobada por la comisión de Evaluación de la tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Ciencias Biológicas con mención en Ecología y Biología Evolutiva, en el examen de Defensa Privada de Tesis rendido el día 26 de Octubre de 2011.

Director de Tesis:

Dr. Patricio Moreno M.

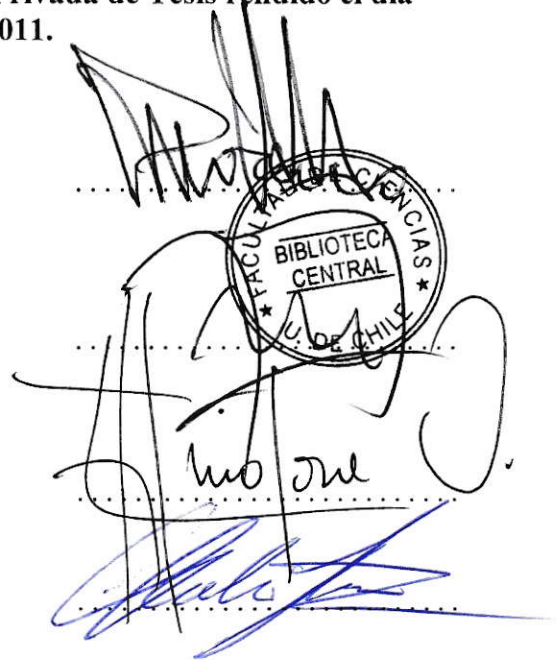
Co-Director de Tesis:

Dr. Rodrigo Villa-Martínez

Comisión de Evaluación de la Tesis

Dr. Luis Felipe Hinojosa O.

Dr. Claudio Latorre H.





*Dedicado a Leslie, a Josefa y Tomás,
a mi Familia y Amigos.*



AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que hicieron posible este estudio, principalmente a mi director de tesis, Dr. Patricio Moreno por su invaluable paciencia, ayuda, guía, crítica y motivación para seguir adelante. Además, quiero agradecer a mi co-director de tesis, Dr. Rodrigo Villa-Martínez, por ayudarme con su conocimiento palinológico y botánico, además de sus importantes consejos y enseñanzas que trascienden el ámbito académico.

A la comisión evaluadora de tesis, conformada por el Dr. Felipe Hinojosa y el Dr. Claudio Latorre por sus comentarios y consejos durante la realización de mi tesis.

A Loreto Hernández, pieza fundamental en el desarrollo de mi tesis, ya que fue ella quién me guió y ayudó en la realización de los procedimientos técnicos involucrados en mi tesis. A los integrantes del Laboratorio de Palinología, Lucía Gonzalorenna, Javiera Videla, Carmen Miranda, Carolina Díaz, Marcela Valenzuela, Michael Shawn Fletcher, William Henríquez, Esteban Sagredo y Enzo Simi, por sus comentarios y ayuda permanente.

A la Dr. Cathy Whitlock, por la oportunidad de asistir a su laboratorio y aprender más acerca del carbón fósil. Además quiero agradecer al Dr. Gustavo Villarroza por su ayuda con la descripción de las tefras.

Al financiamiento proveniente de los proyectos Fondecyt 1070991 y 1110612, al Instituto de Ecología y Biodiversidad. Agradezco a la ayuda en terreno de Roberto Flores, Ana León y Antonio Maldonado. A Loreto Hernández y Lucía Gonzalorenna por realizar los análisis de P.P.I y de carbón macroscópico que sirvieron como antecedentes para la realización de mi tesis.

A Leslie, mi novia, quién ha sabido tener la paciencia y el amor para acompañarme en esta difícil labor, además de ser un apoyo fundamental al desarrollar mi tesis. A mi familia, quienes siempre me motivaron y apoyaron en la realización de mi trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos que me han ayudado y motivado durante todo este proceso.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Páginas
DEDICATORIA	ii
BIOGRAFÍA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Paleoclima y Paleoecología	4
1.2. Presentación de la tesis	6
1.3. Objetivos	8
1.4. Hipótesis de Trabajo	9

2. ÁREA DE ESTUDIO:	14
2.1. Clima	14
2.2. Fuego	17
2.3 Vegetación	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1. Estratigrafía	22
3.2. Cronología	23
3.3. Palinología	23
3.4. Análisis de carbón	26
4. RESULTADOS	27
4.1. Estratigrafía	27
4.2. Cronología	29
4.3. Polen fósil	31
4.4. Registro de carbón	37
5. DISCUSIÓN	42
5.1. Estratigrafía y cronología	42
5.2. Registro de polen	44
5.3. Fuego y Clima	51
5.4. Fuego y Vegetación	53
5.5. Comparación con otros sitios	55

6. CONCLUSIONES	71
7. BIBLIOGRAFÍA	76

ÍNDICE DE FIGURAS.

	Páginas
Figura. 1a y 1b: Mapa de la región de estudio	15
Figura 2. Batimetría de Lago Lepué.	28
Figura 3. Columna estratigráfica y resultados del análisis de pérdida por ignición del registro de Lago Lepué.	28
Figura 4. Modelo de edad del registro integrado de Lago Lepué.	29
Figura 5. Diagramas de porcentaje de polen de los principales taxa arbóreos.	39
Figura 6. Diagrama de porcentaje polen que muestra los taxa herbáceos, helechos, acuáticas y exóticas.	40
Figura 7. Tasas de acumulación de partículas micro y macroscópicas de carbón de Lago Lepué.	41
Figura 8. Comparación entre las dataciones de los distintos sitios estudiados.	43

Figura 9. Digrama de taxa seleccionados con los resultados del análisis de tasa de cambio.	50
Figura 10. Comparación entre % de <i>Nothofagus</i> tipo <i>dombeyi</i> , % <i>Isoetes</i> , % <i>Weinmannia trichosperma</i> , CHAR y Log CHAR de Lago Lepué.	54
Figura 11. Comparación entre sitios, porcentaje de <i>Nothofagus</i> tipo <i>dombeyi</i> .	59
Figura 12. Comparación entre sitios, porcentaje de <i>Eucryphia/Caldcluvia</i> .	62
Figura 13. Comparación entre sitios, porcentaje de <i>Podocarpus nubigena</i> .	64
Figura 14. Comparación entre sitios, porcentaje de <i>Saxegothaea conspicua</i> .	67
Figura 15. Comparación entre sitios, porcentaje de <i>Weinmannia trichosperma</i> .	69

ÍNDICE DE TABLAS.

	Páginas
Tabla 1. Dataciones radiocarbónicas obtenidas de los testigos 0403SC, 0403AT1 y 0201D.	30

RESUMEN

En esta tesis presento el registro palinológico proveniente de Lago Lepué ($42^{\circ}48'28.70''S$ $-73^{\circ}43'4.84''O$, Isla Grande de Chiloé), el cuál presenta una extensión temporal que abarca los últimos 17,8 ka (miles de años antes del presente) permitiendo responder las siguientes preguntas: i ¿De qué manera ha respondido la vegetación a las variaciones climáticas a escalas de tiempo multimilenial, milenial y submilenial en Isla Grande de Chiloé durante los últimos 17,8 ka? ii ¿Cómo han variado los vientos del oeste y la temperatura a escalas de tiempo multimilenial, milenial y submilenial en la latitud de Isla Grande de Chiloé durante los últimos 17,8 ka? iii ¿Existe asociación entre los paleofuegos y los cambios en la vegetación en Isla Grande de Chiloé a escala de tiempo milenial/submilenial? Estudié el registro obtenido a una resolución temporal de 40 años entre muestras, el cual presentó una alta y continua tasa de acumulación con pequeñas variaciones durante los últimos 17.800 años, documentando cambios climáticos en rangos temporales mileniales/ submileniales. Se identificó el siguiente patrón de cambio vegetacional a escalas de tiempos milenial/submilenial: entre 17,5 y 17,8 ka observé depositación de limos, gravas y arcillas con gradación normal, sin identificar la vegetación en esta sección; entre 11,7 y 17,5 ka comienza la depositación de sedimentos orgánicos con dominancia de vegetación de bosque Norpatagónico la que permite inferir condiciones frías y húmedas asociadas a momentos de intensificación o migración de los vientos del oeste hacia la zona de estudio; entre 7,8 y 11,7 ka existe

presencia en el registro de taxa de bosque Valdiviano, lo que permite inferir aumento en la temperatura y disminución de las precipitaciones asociadas a intensificación o migración de los vientos del oeste hacia el sur de la zona de estudio; entre 2,5 y 7,8 ka se registra un incremento del porcentaje de los taxa de bosque Norpatagónico y un descenso sostenido de los taxa de bosque Valdiviano, dando cuenta de un incremento en las precipitaciones asociadas a los vientos del oeste y el descenso gradual de las temperaturas; a partir de 2,5 ka hasta el presente se registra elevada heterogeneidad vegetacional, asociada a un momento de alta variabilidad climática. El análisis de tasa de cambio muestra momentos de notables incrementos en este parámetro, mientras que el registro de carbón de Lago Lepué presenta elevada acumulación entre 8,5 - 12 ka y 1 - 2,4 ka, que se asocia de manera positiva con la variación del taxon *Weinmannia trichosperma*. Cambios en la hidrología del lago se infieren a partir de la variación *Nothofagus* tipo *dombeyi* e *Isoetes*: momentos de mayor humedad se infieren a partir de elevados porcentajes de *Nothofagus* tipo *dombeyi* y bajos porcentajes de *Isoetes*, mientras que los momentos de menor humedad se infieren a partir de mínimos porcentajes de *Nothofagus* tipo *dombeyi* y altos porcentajes de *Isoetes*. Estos cambios tienen una estrecha relación con la variación en la acumulación de carbón, ya que *Nothofagus* tipo *dombeyi* varía en antifase con la acumulación de carbón, mientras que *Isoetes* varía en fase. Todo esto evidencia cambios rápidos y abruptos en la vegetación asociados a cambios en los vientos del oeste y la temperatura, además de perturbación por paleofuegos en la vegetación circundante a Lago Lepué.

ABSTRACT

In this thesis I present the palynological record from Lago Lepué ($42^{\circ} 48'28.70''$ S - $73^{\circ} 43'4.84''$ W, Isla Grande de Chiloé) with a temporal extension covering the last 17.8 ka (thousands years before present) allowing to answer the following questions: i. - Did the vegetation respond to climate changes at multimillennial, millennial and submillennial time scales in Isla Grande de Chiloé during the last 17.8 ka? ii. - Have westerly winds and temperature varied at multimillennial, millennial and submillennial time scales in the latitude of Isla Grande de Chiloé during the last 17.8 ka? and iii. - Is there an association between paleofires and changes in vegetation in Isla Grande de Chiloé at millennial-submillennial time scales? I studied the record obtained at temporal resolution of 40 years between samples. This record showed a high and continuous accumulation rate with little variation during the last 17,800 years, documenting climate change at millennial-submillennial time scales. We identified the following pattern of vegetation change on millennial-submillennial time scales: between 17.5 and 17.8 ka I observed deposition of silt, gravel and clay with normal grading, and the identification of vegetation in this section was not performed; between 11.7 and 17.5 ka, organic sediments deposition begins and the dominance of North Patagonian forest taxa allows to infer cold and humid conditions associated with moments of intensification or migration of the westerly winds to the area of study; between 7.8 and 11.7 ka, presence in the record of Valdivian forest taxa allows to infer increased temperature and reduced

precipitation associated with enhanced westerlies or its migration south from the study area; between 2.5 and 7.8 ka there is an increase in the percentage of North Patagonian forest taxa and a sustained decrease in Valdivian forest taxa, accounting for an increase in rainfall associated with westerly winds and the gradual declining of temperatures; from 2.5 ka to the present the record shows high vegetation heterogeneity associated with a period of high climatic variability. The rate of change analysis shows moments of dramatic increases in this parameter, while the charcoal record shows high accumulation in Lago Lpeué from 8.5 to 12 ka and 1 to 2.4 ka, which is positively correlated with *Weinmannia trichosperma* taxon variation. Changes in lake hydrology are inferred from the variation of *Nothofagus dombeyi* type and *Isoetes*: moments of greatest moisture are inferred from high percentages of *Nothofagus dombeyi* type and low *Isoetes* percentages, while moments of lower moisture are inferred from minimum percentages *Nothofagus dombeyi* type and high percentages of *Isoetes*. These changes are closely related to variation in carbon accumulation as *Nothofagus dombeyi* type varies in antiphase with the accumulation of charcoal, whereas *Isoetes* vary in phase. These results are evidence of rapid and abrupt changes in vegetation, associated with westerly winds and temperature, as well as disturbance in the surrounding vegetation paleofires at Lago Lpeué.

1. Introducción

Estudios palinológicos realizados en Patagonia noroeste (~40-43°S; ~71-74°O; Villagrán 1985, 1988a, 1988b, Heusser 1987, 1990, 1994, 2003, Heusser y col., 1999, Moreno 2000, Moreno & León 2003, Moreno 2004, Abarzúa y col., 2004, Abarzúa & Moreno 2008) han descrito variaciones en la paleovegetación a un nivel de detalle que permite estudiar la cronología, frecuencia y dirección de cambios vegetacionales y climáticos a escalas de tiempo milenial y submilenial a partir del último máximo glacial (UMG). El UMG es el momento de la última glaciación en el cual se registra el máximo volumen de hielo a nivel global entre y ha sido acotado cronológicamente entre ~16 y 28 ka (ka = miles de años calendario antes del presente); posterior a él, entre 11-16 ka ocurre un periodo frío y húmedo, que da paso al actual período interglacial entre 0 -11ka. El interés que subyace en desarrollar estudios palinológicos de alta resolución temporal es entender cómo ha funcionado el sistema climático desde el UMG a escalas de tiempo de centenas y decenas de años, cuál es la rapidez, frecuencia y estabilidad durante las transiciones climáticas, qué dirección presentan estos eventos de cambio y cuál es la capacidad de respuesta que presenta la biota a estos cambios.

Diversos estudios paleoclimáticos han logrado describir cambios en el clima que ocurren a escalas de anual, decenal y centenal, como es el caso de los estudios sedimentológicos en la cuenca de Cariaco, ubicada frente a la costa al noroeste de Venezuela (Haug y col., 2003); estudios de sedimentación clástica asociada a eventos aluvionales gatillados por anomalías positivas de precipitación adjudicables a El Niño realizados en Lago Pallcacocha, ubicado al sur de los Andes Ecuatorianos (Moy y col., 2002) y el más reciente testigo de hielo NGRIP obtenido en Groenlandia (Steffensen y col., 2008). En estos trabajos se enfatiza la alta resolución temporal alcanzada, llegando a encontrar variación a escala anual en el caso de NGRIP y Cariaco.

En Patagonia noroeste se han desarrollado estudios sobre la base de registros sedimentarios lacustres, de pantanos y testigos marinos, a partir de los cuales se infieren cambios climáticos (Heusser 1987, 1990, 1994 2003, Heusser y col., 1999, Moreno 2000, Moreno & León 2003, Moreno 2004, Abarzúa y col., 2004, Abarzúa & Moreno 2008) además de caracterizar la actividad de fuego, elemento que también está condicionado por el clima (Moreno 2003, 2004, Abarzúa & Moreno 2008). Sin embargo, la distinta naturaleza de los ambientes deposicionales de donde se han obtenido tales registros (lagos, pantanos y fondo marino) genera problemas al momento de realizar interpretaciones y comparaciones, debido a que la tafonomía de los distintos ambientes de donde se han obtenido estos registros es distinta y la manera en que se documenta la paleovegetación y el paleoclima en cada uno ellos

depende de distintos factores, tales como la superficie del lago o pantano, hidrología, morfología de la cuenca y su ubicación (Jacobson & Bradshaw, 1981), que no es posible tener registros comparables y continuos que permitan registrar las variaciones climáticas de manera homogénea a través del tiempo a partir del UMG. También, la presencia o ausencia de afluentes al lago determinará qué tan local es la señal de polen del registro obtenido del lago, siendo un lago con una señal de polen predominantemente local (pocos cientos de metros en torno al lago) aquel que presente una cuenca pequeña, cerrada (sin afluentes) y un lago con una señal de polen predominantemente regional (grandes distancias en torno al lago), aquel que presente una cuenca grande, con afluentes que aporten señales polínicas provenientes de sectores lejanos. Sumado a esto, la presencia de ambientes con mayor o menor constancia deposicional influencia el grado de continuidad estratigráfica en los registros obtenidos, condicionando así las interpretaciones paleoclimáticas debido a la presencia de hiatos o sedimentación discontinua o esporádica en estos registros. La obtención de un registro que presente continuidad estratigráfica en un mismo ambiente deposicional, me permitirá conocer la variación vegetacional de manera continua y revelará si ocurren cambios en la vegetación y clima a una escala local o regional.

1.1. Paleoclima y paleoecología

Diversos estudios en Patagonia noroeste (Villagrán 1985, 1988a, 1988b, Heusser, 1987, 1990, 1994, 2003; Heusser y col., 1999, Moreno 2000, Moreno & León 2003, Moreno 2004, Abarzúa & Moreno 2008) han documentado cambios en el clima desde el UMG atribuidos a variaciones en la temperatura y en la posición y/o intensidad de los vientos del oeste a escalas de tiempo multimilenial y milenial. Considerando sólo aquellos registros provenientes de lagos que son capaces de monitorear las variaciones vegetacionales en torno a ellos, continuos y bien datados es posible resumir la estructura y cronología de cambios en Patagonia noroeste de la siguiente manera:

- 1- inicio de la última terminación glacial a los 17,5 ka, marcado por un alza de la temperatura respecto al UMG (Heusser y col., 1999, Moreno 2000, Moreno & León 2003, Moreno 2004).
- 2- Posteriormente, entre 11 y 15 ka se ha descrito una serie de pulsos de calentamiento y enfriamiento (Heusser y col., 1999, Moreno 2000, Moreno & León 2003, Moreno 2004) a escalas de tiempo milenial, dando paso al actual interglacial a partir de los 11 ka con los valores más altos de temperatura y los menores valores de precipitación del último ciclo glacial-interglacial entre los 7,6 y 11 ka (Moreno 2004).
- 3- Posteriormente comienza una tendencia hacia condiciones templado-frías con pulsos discretos de descenso en la temperatura a los 7,6; 6,9

y 5,7 ka (Moreno 2004). Esta tendencia fría fue interrumpida brevemente por un evento cálido-seco entre 4,1-3,8 ka.

- 4- Más hacia el presente se ha reportado un calentamiento a partir de 2,9 ka, seguido de un descenso en las precipitaciones a partir de 1,8 ka.

Sumado a estos cambios en el clima, varios estudios han dado cuenta de actividad de fuego a diferentes escalas espaciales (local y regional) en rangos de tiempo milenial (Abarzúa & Moreno 2008, Whitlock y col., 2007; Power y col., 2008), presentando momentos de alta ocurrencia de fuego entre 8,5-12,5 ka y un incremento en la ocurrencia de fuego a partir de 3 ka (Heusser 2003, Moreno 2004, Abarzúa & Moreno 2008). La ocurrencia de fuego ha sido asociada tanto a un patrón de variación multimilenial de los vientos del oeste (Moreno 2004, Abarzúa & Moreno 2008) como al impacto de la ocupación humana en la región (Heusser, 1987, 1990, 1994; Haberle & Bennett, 2004; Huber et al., 2004). En los ambientes húmedos e hiperhúmedos donde se ubican los bosques lluviosos de Patagonia noroeste, el combustible leñoso requiere extensos periodos de sequías para inflamarse, generándose incendios de alta intensidad, pero poco frecuentes que están determinados por la humedad del combustible; mientras que en ambientes más secos, el combustible se seca rápidamente, provocando incendios frecuentes de baja intensidad, siendo este tipo de incendios limitados principalmente por la fuente de ignición y la acumulación de combustible. Por lo tanto, en los ambientes de bosques lluviosos, la ocurrencia de fuegos está controlada por la

humedad del combustible (Huber y col., 2004), más que por la fuente de ignición, ya que si las condiciones climáticas mantienen húmedo el combustible, el incendio no se extenderá cubriendo una gran área. Es en este contexto, que la variación de las precipitaciones asociada a los cambios en los vientos del oeste estaría determinando un control a escalas de tiempo milenial/submilenial en la ocurrencia de fuego (Abarzúa & Moreno, 2008). Además, esta ocurrencia de fuego es un importante conductor de cambio vegetacional a escalas de tiempo decadal/centenal debido a que las perturbaciones provocadas por fuego alteran la composición local de la vegetación, generando incrementos de taxa vegetacionales colonizadores y sombra-intolerante, tales como *Weinmannia trichosperma* y Poaceae (Abarzúa & Moreno, 2004).

1.2. Presentación de esta tesis

Los diversos estudios en sedimentos lacustres desarrollados en Patagonia noroeste han descrito variaciones climáticas a escalas de tiempo multimilenial y milenial, esbozando un patrón de variación climática y de actividad de fuego a escala de tiempo submilenial durante los últimos 18 ka (Heusser y col., 1999, 2003; Moreno 2000; Moreno 2004; Abarzúa & Moreno 2008). Dentro de los estudios mencionados, sin embargo, no es posible encontrar registros que presenten sedimentación lacustre continua desde el UMG hasta el presente. En esta investigación presento un registro palinológico de Lago

Lepué, ubicado en Isla Grande de Chiloé ($42^{\circ}48'28.70''S$ $-73^{\circ}43'4.84''O$, 240 m.s.n.m., ~376 ha), con una resolución temporal de 40 años en promedio entre muestras. Esta intensidad de muestreo permite caracterizar y analizar cambios en la paleovegetación y paleoclima a escalas de tiempo centenal-milenial.

Lago Lepué se ubica en una cuenca pequeña y cerrada, aspecto que permite maximizar la señal local de polen respecto a la señal de polen extralocal y regional (Jacobson & Bradshaw 1981) de lagos de mayor superficie y con afluentes como Lago Llanquihue o Puyehue. Sin embargo, Lago Lepué presenta un área de ~ 376 ha mucho mayor a los lagos estudiados previamente en Patagonia noroeste, tales como Lago Condorito (Moreno, 2004) con un área menor a 1 ha, Lago Tahui (Abarzúa y col., 2004) y Lago Melli (Abarzúa & Moreno, 2008) con una superficie de ~ 9 ha, por lo que la señal polínica sensada en Lepué no será tan local como la presentada en estos estudios previos debido a que la superficie de captación de polen es mucho mayor y el territorio abarcado por el perímetro de Lago Lepué es mayor, lo que implica mayor diversidad de vegetación. El registro polínico de Lago Lepué permite estudiar la dirección y frecuencia cambios vegetacionales y climáticos desde el término del UMG hasta el presente, con bajo tiempo deposicional (años/cm) y continuidad estratigráfica en un mismo ambiente deposicional a lo largo de todo el registro, lo que posibilita responder las siguientes preguntas:

1.- ¿De qué manera ha respondido la vegetación a las variaciones climáticas a escalas de tiempo multimilenial, milenial y submilenial en Isla Grande de Chiloé los últimos 17.800 años?

2.- ¿Cómo han variado los vientos del oeste y la temperatura a escalas de tiempo multimilenial, milenial y submilenial en la latitud de Isla Grande de Chiloé los últimos 17.800 años?

3.- ¿Existe asociación entre paleofuegos y los cambios en la vegetación en Isla Grande de Chiloé a escala de tiempo milenial - submilenial?

1.3. Objetivos

1- Documentar variaciones de la vegetación y clima desde 17,8 ka sobre la base de un registro sedimentario obtenido a partir de Lago Lpué. El registro en cuestión cuenta con una estratigrafía excepcional, la cual permite generar una serie temporal detallada para examinar las tasas de cambio tanto de polen como de partículas de carbón mediante análisis palinológico y de carbón fósil a escalas finas de tiempo.

2- Determinar la historia de fuego en la zona de estudio mediante el análisis de partículas micro y macroscópicas de carbón preservadas en los sedimentos, con el fin de determinar si existe coherencia temporal con el registro

estratigráfico y palinológico que permita dilucidar los mecanismos que controlan la actividad de fuego en torno a Lago Lepué.

1.4. Hipótesis de trabajo

Actualmente existe un sólo registro palinológico continuo en Patagonia noroeste, Lago Condorito (Moreno 2000, 2004), generado a partir de un lago con sedimentación lacustre continua y altas tasas de acumulación que posibilita realizar un estudio palinológico a alta resolución temporal (~40 años entre muestras) que abarca los últimos 15.000 años. Lago Lepué constituye un nuevo registro que también presenta una sedimentación continua con altas tasas de acumulación lo que permite poner a prueba los hallazgos descritos previamente en Lago Condorito, además de otros estudios realizados en Isla Grande de Chiloé (registros de Lago Melli y Tahui, Abarzúa y col., 2004; Abarzúa & Moreno 2008, respectivamente). Considerando las características excepcionales de Lago Lepué es posible formular las siguientes hipótesis:

Hipótesis 1: Rapidez y magnitud de cambio vegetacional

Se ha descrito en Patagonia noroeste un patrón de cambio vegetacional a escala de tiempo multimilenial y milenial asociado a la influencia de los vientos del oeste, tanto en el continente como en Isla Grande de Chiloé. El

registro de Lago Lepué permitirá examinar los cambios vegetacionales a una escala de tiempo multimilenial, milenial y submilenial, permitiendo conocer si estos cambios en la vegetación ocurren en respuesta a los vientos del oeste o a condiciones particulares del lago. Para ello, se realizará una comparación sobre la base de una cronología común para los distintos registros obtenidos en Patagonia noroeste:

-Hipótesis: Si los cambios en los vientos del oeste han determinado las variaciones vegetacionales en el registro de Lago Lepué, entonces debería encontrar el siguiente patrón de cambio:

- Cambios en la vegetación a escalas de tiempo multimilenial que den cuenta de momentos húmedos entre 11-17,5 ka y entre 2,9-7,6 ka; mientras que entre 7,6-11 ka y entre 0-2,9 ka se documenten momentos de menor humedad. Esto se evidenciará mediante la variación de los taxa higrófilos, como *Nothofagus* tipo *dombeyi*, esperando encontrar en los momentos húmedos altos porcentajes de taxa higrófilos, mientras que en los momentos de menor humedad, espero encontrar bajos porcentajes de taxa higrófilos.

Hipótesis 2: Variación en la integración de la señal polínica ¿Local o regional?

El registro de Lago Condorito presenta variaciones abruptas en la depositación de polen de los distintos taxa. Al ser un lago pequeño, con una

superficie de < 1 ha y una profundidad de 2,7 m, la sensibilidad que presenta este lago frente a la depositación de polen maximiza la señal local (pocos cientos de metros en torno al lago) frente a las señales extralocales y regionales (grandes distancias en torno al lago), mientras que Lago Lepué presenta un área de aproximadamente 376 ha y ~10 m de profundidad, entonces, ¿cómo será la integración de la señal polínica del registro de Lago Lepué respecto a lo obtenido en el registro de Lago Condorito? :

-Hipótesis: Si la mayor superficie de Lago Lepué (respecto a Lago Condorito) condiciona la integración de lluvias polínicas provenientes de fuentes local, extralocal y regional, entonces se espera que la magnitud y rapidez de los cambios en el registro polínico de Lepué sean menores a los observados en Lago Condorito por un efecto de la dilución de la señal polínica local por señales extralocales y regionales.

Hipótesis 3: Fuego y Vegetación

Se ha descrito que la actividad de fuego constituye un régimen de perturbaciones en la vegetación que ha inducido cambios en la composición del bosque a escalas de tiempo milenial (Abarzúa & Moreno 2008). Además, se han documentado variaciones en la ocurrencia de fuego a escalas de tiempo multimilenial en Patagonia noroeste, atribuido a un control climático asociado a los cambios en la intensidad y/o posición de los vientos del oeste a partir del

UMG. Lago Lepué presenta un registro de acumulación de partículas de carbón con una resolución temporal que da cuenta de variaciones en la ocurrencia de fuego a escalas de tiempo multimilenial, milenial y submilenial. Esto permitirá conocer si la ocurrencia de fuego registrada en Lago Lepué se relaciona con las variaciones en la vegetación y si existe un control climático asociado a los vientos del oeste:

- Hipótesis 1: Si la ocurrencia de paleofuegos en Lago Lepué ocasionó perturbación en la vegetación entonces debería esperar cambios en la composición de la vegetación que responde a perturbaciones como aumento de poáceas e incremento de taxa sombra-intolerante que ocurran en fase con el registro de paleofuegos.

- Hipótesis 2: Si la ocurrencia de paleofuegos en Lago Lepué responde a las variaciones en los vientos del oeste, entonces yo debería esperar:

- Incrementos en la acumulación de carbón que ocurran entre 8,5-12,5 ka y un incremento sostenido a partir de 3 ka.

- Acumulación de carbón que dé cuenta de la ocurrencia de fuego en momentos de bajos porcentajes de taxa hidrófilos y alto porcentaje de taxa acuáticos, asociados a un debilitamiento o migración de los vientos del oeste hacia el sur de esta zona. Si los incrementos en la acumulación de carbón ocurren en momentos de altos porcentajes de taxa hidrófilos y disminución del porcentaje de taxa acuáticos asociados a un fortalecimiento o migración de los

vientos del oeste hacia esta zona, la ocurrencia de fuego ocurriría en instantes húmedos, ligando esta ocurrencia a factores no climáticos, como a actividad humana en la zona.

2. Área de estudio

La Región de los Lagos se ubica en la zona sur de Chile ($40,13^{\circ}$ - $44,3^{\circ}$ S; $74,49^{\circ}$ - $71,34^{\circ}$ O), abarcando desde el Océano Pacífico hasta la Cordillera de los Andes. Esta región se caracteriza por presentar al norte del Canal de Chacao (Figura 1) un relieve compuesto por la Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes. Seno Reloncaví y el mar interior de Chiloé marcan el fin de la Depresión Intermedia, comenzando una geografía constituida por el Golfo de Ancud, Golfo de Corcovado, diversos fiordos y el archipiélago de Chiloé. La Cordillera de la Costa continúa en Isla Grande de Chiloé y la Cordillera de los Andes continúa en Chiloé Continental (Provincia de Palena). En Isla Grande de Chiloé es posible encontrar muchísimos lagos de origen glacial, debido a que este sector estuvo parcialmente cubierto por los lóbulos glaciales Golfo de Ancud y Corcovado durante el UMG. Lago Lepué es uno de estos lagos y se posiciona en una depresión intermorrénica.

2.1. Clima

Importantes variables en el clima de la Región de los Lagos son el cinturón de vientos del oeste, los gradientes topográficos y la corriente de Humboldt

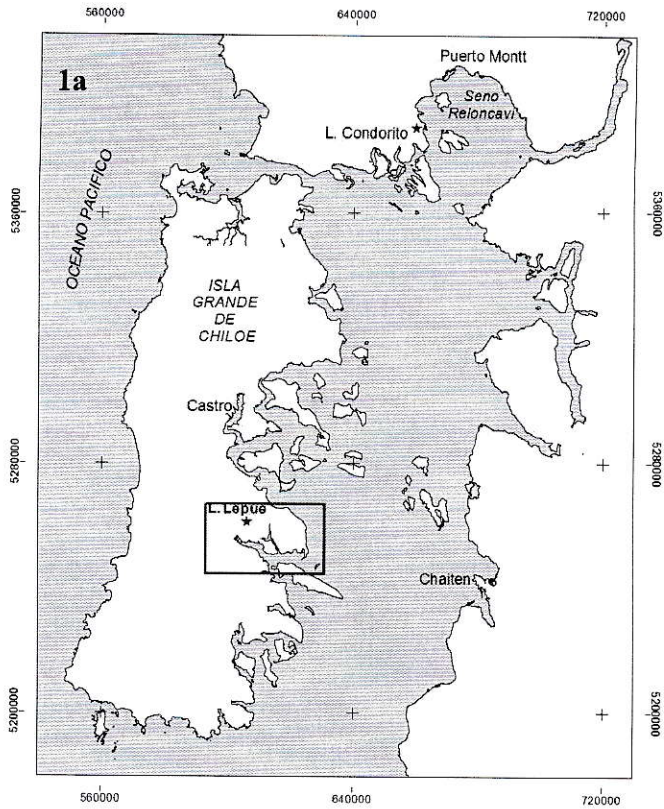
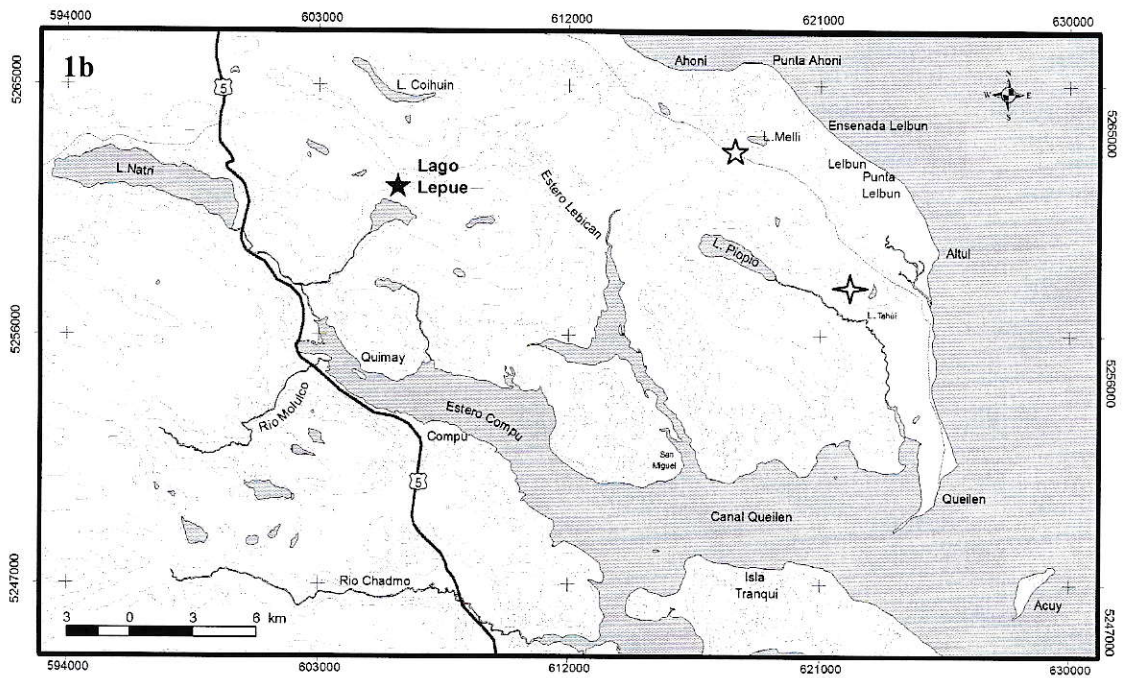


Figura. 1a y 1b: Mapa de la región de estudio con la ubicación de Lago Lepué, Isla Grande de Chiloé. La figura 1a muestra Isla Grande de Chiloé y Lago Lepué (rectángulo y estrella negra) ubicado en la península de Queilén, además de la ubicación de Lago Condorito (estrella negra). La figura 1b muestra el detalle de la península de Queilén con la ubicación de Lago Lepué, y dos sitios de comparación, Lago Melli (estrella cinco puntas blanca) y Lago Tahui (estrella cuatro puntas blanca). Las coordenadas del mapa están en metros (coordenadas UTM), la equidistancia de las curvas de nivel es de 50 metros y la línea negra marcada con el número 5 corresponde a la ruta 5 sur.



(Miller, 1976). La precipitación en Región de Los Lagos depende todo el año de la influencia de los Vientos del Oeste, existiendo una alta correlación entre la intensidad del viento zonal (velocidad del viento) y las precipitaciones en esta región (Garreaud y col. 2007, Moy y col. 2008). El ciclo anual incluye un incremento de las precipitaciones durante invierno, mientras que durante el verano se observa una disminución en las precipitaciones (Montecinos & Aceituno, 2003).

La estación meteorológica de Osorno indica valores de precipitación promedio de los meses de invierno (Junio, Julio y Agosto) de 185,2 mm y en la estación de Puerto Montt 205,8 mm, mientras que en los meses de verano (Diciembre, Enero y Febrero) se registran valores promedio de 53,3 y 89,9 mm en las estaciones de Osorno y Puerto Montt respectivamente. Se evidencia una clara diferencia entre la precipitación en la Depresión Intermedia en Osorno (promedio anual de precipitaciones 1318,3 mm) versus los montos de precipitación en la costa, según los datos obtenidos de la estación de Puerto Montt (1719,8 mm) (Dirección Meteorológica de Chile).

El efecto orográfico de las cordilleras de la Costa y Andes tiene un impacto importante en la precipitación: mayor precipitación anual en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa en Isla Grande de Chiloé respecto a la vertiente oriental (~5000 versus ~2000 mm respectivamente, Heusser, 1999), mientras que a la misma latitud en la ladera Oeste de la Cordillera de los

Andes la precipitación anual alcanza a ~5000 mm (Heusser, 1999). Además, patrones de variabilidad climática como El Niño-Oscilación del Sur ocasionan perturbaciones en efecto de los vientos del oeste en Patagonia Noroeste, provocando disminución de las precipitaciones de verano en eventos de El Niño con una periodicidad de 4-5 años, intensificando este efecto cada 6-7 años, y ocasionando aumento de precipitaciones de verano durante eventos La Niña (Montecinos & Aceituno 2003).

El promedio de las temperaturas en los meses de verano (Diciembre-Enero-Febrero) en la estación de Puerto Montt son 19°C la máxima y 9°C la mínima, mientras que en la Depresión Intermedia las máximas temperaturas llegan a 22°C y a las mínimas a 8°C (estación de Osorno). Durante los meses de invierno (Junio-Julio-Agosto), la temperatura en Puerto Montt llega a valores máximos de 10,5°C y mínimos de 4°C, mientras que en la Depresión Intermedia la temperatura máxima es de 11°C y la mínima de 3,4°C.

2.2. Fuego

La ocurrencia de fuego en la Región de los Lagos desde el UMG ha sido explicada mediante factores climáticos o humanos que gatillan su ocurrencia, pero además se ha descrito un control climático como condicionante de los paleofuegos que han acontecido en la Región de los Lagos (Heusser, 1987, 1990, 1994; Haberle & Bennett, 2004; Huber y col., 2004). Las condiciones

climáticas que estarían permitiendo la ocurrencia y persistencia de los fuegos estarían relacionadas con variaciones de precipitación asociadas a los vientos del oeste a escalas de tiempo multimilenial (Moreno y col., 2001; Whitlock y col., 2006). Además, variaciones en escalas de tiempo milenial - submilenario en los eventos de fuego en esta región (Whitlock y col. 2007, Power y col. 2008) permite ligar esta ocurrencia de fuego a variaciones en la vegetación ocurridas en rangos de miles y centenas de años.

En esta tesis analicé la acumulación de partículas micro y macroscópicas de carbón a lo largo del registro sedimentario de Lago Lepué con el fin de documentar paleofuegos en el área de estudio. Las partículas macroscópicas de carbón preservadas en el registro permiten determinar si los incendios que las originaron ocurrieron a unos pocos kilómetros del lago, indicando una señal local, mientras que las partículas microscópicas de carbón, que son fácilmente transportadas por el viento, permiten determinar si los incendios ocurrieron a distancias mayores del lago, indicando una señal extralocal y regional.

2.3. Vegetación

La vegetación predominante en Isla Grande de Chiloé corresponde a bosques siempreverde latifoliados templado-lluviosos, compuestos por distintas

especies vegetacionales que se manifiestan en menor o mayor dominancia (Schmithüsen, 1956; Villagrán, 1985):

- *Bosque Laurifolio Valdiviano*: Se distribuye en zonas de baja altitud en el norte de Isla Grande de Chiloé, en los faldeos orientales de la Cordillera de Piuchué con una cota superior altitudinal de 250 m.s.n.m. y a 200 m.s.n.m. en la vertiente de exposición Oeste, con un límite de distribución sur ubicado en Lago Huillinco. A pesar de que muchas de las especies dominantes del Bosque Laurifolio Valdiviano también se encuentran presentes en el Bosque Laurifolio Norpatagónico, las especies *Eucryphia cordifolia*, *Gevuina avellana* y *Aextoxicon punctatum* (Villagrán 1985) se han considerado indicadores del Bosque Laurifolio Valdiviano debido a la presencia restringida que presentan en rangos altitudinales.

- *Bosque Laurifolio Norpatagónico*: Se distribuye en ambos lados de la Cordillera de Piuchué entre 250-450 m.s.n.m. en la vertiente Oeste y entre 200-350 m.s.n.m. en la vertiente Este. Se caracteriza por la fuerte dominancia de mirtáceas y *Laureliopsis philipiana*, además de la presencia de *Weinmannia trichosperma* y *Nothofagus dombeyi*.

- *Bosque Laurifolio Nordpatagónico-Subantártico*: domina por sobre 450 m.s.n.m. por ambas laderas de la Cordillera de Piuchué, en estos sectores se presenta como manchones discontinuos de bosque adyacentes a sectores con

tundras magallánicas. Los principales componentes arbóreos son las coníferas *Saxegothaea conspicua*, *Podocarpus nubigena*, *Fitzroya cupressoides* y *Pilgerodendron uviferum*; las nothofagáceas dominantes son *Nothofagus dombeyi*, *N. betuloides*, *N. nitida*, las que suelen estar asociadas a *Drimys winteri*.

- *Tundras Magallánicas*: Por sobre el límite arbóreo, la vegetación está compuesta por un mosaico de comunidades vegetales compuestas por pastos, arbustos y hierbas que crecen en sustratos rocosos inestables (Schmithüsen, 1956; Villagrán, 1980). Dentro de esta formación encontramos las especies *Donatia fascicularis*, *Astelia pumila*, *Oreopulus obtusangulus*, *Taipenia pumila*, *Gaimardia australis*, *Tetroncium magellanicum* y *Myrteola nummularia*, estando acompañadas generalmente por ejemplares de tamaño pequeño de *Pilgerodendron uviferum*, *Nothofagus antarctica*, *Nothofagus betuloides*, *Embotrium coccineum* y *Tepualia stipularis* (Rodrigo Villa, comunicación personal).

La presencia de estas formaciones de bosque en Isla Grande de Chiloé depende de distintos factores climáticos, geográficos e hidrológicos locales, lo cual modifica su distribución generando un interesante mosaico vegetal. Los factores que condicionan la distribución de estas formaciones de bosques en Isla Grande de Chiloé son los siguientes:

- **Latitudinal:** El Anticiclón del Pacífico bloquea el aporte de precipitaciones de los Vientos del Oeste, lo que induce una disminución en las precipitaciones hacia bajas latitudes a lo largo de la costa pacífica sudamericana. La variación del bosque va desde la dominancia de bosque templado lluvioso Nordpatagónico en el Sur de Isla Grande de Chiloé hacia bosque Valdiviano en el Norte de Isla Grande de Chiloé.
- **Altitudinal:** a raíz del efecto orográfico provocado por el choque de las masas de viento húmedo y frío con la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes, ocurre un aumento de la precipitación y disminución de la temperatura, induciendo la dominancia de bosques Valdivianos a baja altitud y bosques Nordpatagónico/Subantártico o incluso ocurrencia de Tundras Magallánicas a mayores altitudes en ambas cordilleras.
- **Sombra de lluvia:** Contraste entre la vegetación de las laderas occidentales y orientales de la cordillera de la Costa y de los Andes, debido a que la ladera occidental enfrenta la nubosidad y a los vientos del oeste, lo que provoca mayor precipitación y proliferación de vegetación higrófila, mientras que la ladera oriental presenta menor precipitación y proliferación de vegetación resistente ambientes más secos.

3. Materiales y Métodos

Esta tesis se centra en el análisis de polen y partículas de carbón registradas en Lago Lepué durante los últimos 17.800 años. En el año 2002 se obtuvo una serie de testigos desde Lago Lepué mediante el uso de una plataforma de barrenaje y un barreno de pistón Wright. En este estudio utilicé el testigo largo 0201D por tratarse del registro con la estratigrafía más completa y con mayor espesor de sedimentos. En el año 2004 volvimos al sitio para obtener el testigo corto 0403SC, que cubre la interfase de agua/sedimento, y el testigo Wright flotante 0403AT1.

3.1. Estratigrafía

Los sedimentos se describieron sobre la base de variaciones texturales, suplementada posteriormente con imágenes de rayos X de los testigos. A continuación se llevó a cabo el análisis de Pérdida por Ignición (PPI) sobre muestras de 1cc de sedimento las que sometidas a quemas sucesivas de 550°C por 2 horas y 925 °C por 4 horas para determinar el contenido de materia orgánica, carbonatos y siliciclastos (Bengtsson & Enell, 1986). Los testigos 0403SC, 0403AT1 y 0201DT1 se correlacionaron utilizando la densidad seca de materia inorgánica (Figura 3), lo que permitió integrar las series

individuales en una estratigrafía maestra que abarca desde el inicio de la sedimentación lacustre en el sitio hasta el presente.

3.2. Cronología

La cronología del sitio se basa en 27 dataciones radiocarbónicas AMS (Accelerator Mass Spectrometry) (Tabla 1) que obtuvimos a partir de muestras de sedimento de 1 cm de espesor o macrorrestos vegetales. Las edades radiocarbónicas fueron convertidas a edades calendario antes del presente (presente = 1950 EC, Era Común) utilizando el data set INTCAL09 y SH Atmosphere del programa CALIB versión 6.0 (Stuiver, 2005). Sobre la base de estos resultados construí un modelo de edad a través de un spline cúbico con un ajuste de 0,15 mediante el software R (Figura 4), que permitió asignar edades interpoladas a cada nivel del registro de Lago Lepué. El modelo de edad consideró la instantaneidad deposicional de las tefras (material proveniente de erupciones volcánicas) mediante la sustracción de sus espesores, lo cual generó la variable longitud de sedimentos sin tefras.

3.3. Palinología

Tomé muestras de sedimento con un espaciamiento de 2 a 6 cm entre niveles analizados. Cada muestra comprende 1 centímetro de espesor del registro, de

donde tomé 1 cc de sedimento para ser sometido al procedimiento palinológico estándar (Faegri and Iversen, 1989) que incluyó defloculación con KOH al 10%, tamizado (106 μm), HF al 48% y acetólisis. Los cálculos de concentración y tasa de acumulación los realicé utilizando como referencia la espora exótica de *Lycopodium*, mediante la adición de un número conocido de estas esporas a las muestras durante el procesamiento de polen justo antes de la acetólisis. Las muestras las monté en medio líquido de metilsilicona y las conté en un estereomicroscopio Zeiss Axioskop 40 a un aumento de 400x.

Al realizar el conteo de polen consideré como mínimo 300 granos de polen terrestre, categoría que incluye taxa arbóreos y no arbóreos, contándose por separado el polen de plantas acuáticas y helechos. La abundancia de polen y esporas las expresé en porcentajes respecto de las siguientes sumas: la suma total de granos de polen terrestre, la suma total de polen acuático, suma de polen total (polen terrestre + polen acuático) y la suma total de esporas de helechos. Al realizar por separado los cálculos porcentuales de polen terrestre, acuático y esporas, es posible analizar aisladamente las variaciones del polen terrestre asociadas a variaciones climáticas o eventos de perturbación (Figuras 5 y 6) ya que el polen acuático y esporas de helechos pueden presentar variaciones asociadas a cambios muy locales en el sustrato e hidrología del sitio.

La identificación de granos de polen se realizó utilizando las descripciones publicadas por Heusser (1971) y Villagrán (1980) además de la utilización de la palinoteca disponible en el Laboratorio de Paleoecología de la Universidad de Chile, llegando a identificar hasta nivel de género en la mayoría de los casos, mientras que en otros casos, sólo se llegó a determinar la identidad hasta el nivel de familia (e.g. Poaceae) y en algunos es posible llegar a la especie (*Weinmannia trichosperma*, *Podocarpus nubigena*, *Saxegothaea conspicua*, *Tepualia stipularis*). Un caso particular es el palinomorfo *Nothofagus* tipo *dombeyi*, que agrupa diversas especies del género *Nothofagus* (*N. dombeyi*, *N. betuloides*, *N. pumilio*, *N. antarctica*, *N. leoni*, *N. alessandri* y *N. nitida*) dado que no es posible identificarlas a nivel de especie.

Identifiqué zonas polínicas en el registro de Lago Lepué basándome en los cambios más importantes observados en la estratigrafía polínica. Esta zonación se complementó con un ordenamiento CONISS (Constrained Incremental Sum of Squares) acotado estratigráficamente. Este análisis se realizó con todos los taxa de polen terrestre que presentaron una abundancia mayor o igual al 2% en el registro, con lo cual se recalcularon las sumas y porcentajes de polen terrestre.

Calculé el parámetro tasas de cambio a partir de todos los taxa terrestres incluidos en la suma polen terrestre y que poseían valores $\geq 2\%$ con el fin de cuantificar la magnitud y rapidez con que ocurrieron los cambios en la

estratigrafía polínica. Para ello suavicé los datos de polen con una media móvil de 5 puntos e interpolé muestras a intervalos regulares utilizando una ventana temporal de 150 años (Moreno 2004).

3.4. Análisis de carbón

El conteo de partículas microscópicas de carbón (<106 μm) lo llevé a partir de las preparaciones de polen. El registro de partículas macroscópicas de carbón se realizó con anterioridad a esta tesis (Patricio Moreno, datos no publicados), y se efectuó a partir de muestras de 2 cc de sedimento obtenido a partir de secciones contiguas de un 1 cm de espesor a lo largo de los testigos. Las muestras fueron disgregadas en KOH 10 % y se tamizaron en fracciones >212 y >106 μm . Los datos obtenidos se encuentran en unidades de concentración (partículas de carbón * cm^{-3}) y al dividirlo por el tiempo depositacional (año * cm^{-1}) se obtiene la tasa de acumulación de partículas de carbón (partículas * cm^{-2} * año⁻¹).

4. Resultados

4.1. Estratigrafía

En el año 2002 se obtuvieron los testigos 0201A, 0201B, 0201C, 0201D y 0201E a partir de Lago Lepué. Los registros 0201A, B y C fueron obtenidos a una profundidad de agua de 5 metros, mientras que los registros 0201D y E se obtuvieron a una profundidad de agua de 10 metros, el sector más profundo de la cuenca en la actualidad (Figura 2). En esta tesis utilicé el registro 0201D ya que es el registro de mayor longitud (12,5 m) con la estratigrafía más completa y mayor continuidad de los obtenidos en el fondo del lago, complementado con los testigos 0403SC (interfase agua/sedimento) y 0403AT1 (testigo Wright flotante). El registro integrado completa la estratigrafía de Lago Lepué, abarcando la totalidad del registro desde el inicio de la sedimentación lacustre al término del UMG hasta el año 2004 EC.

El registro de Lago Lepué consta de barro orgánico lacustre (gyttja) carente de carbonatos (<5%) (Figura 3), con limos, arenas y gravas con gradación normal entre 1182-1211 cm de profundidad. Se detectaron tres tefras: a los 159 (3 cm de espesor), 626 (7 cm de espesor) y 828 (44 cm de espesor) cm de profundidad.

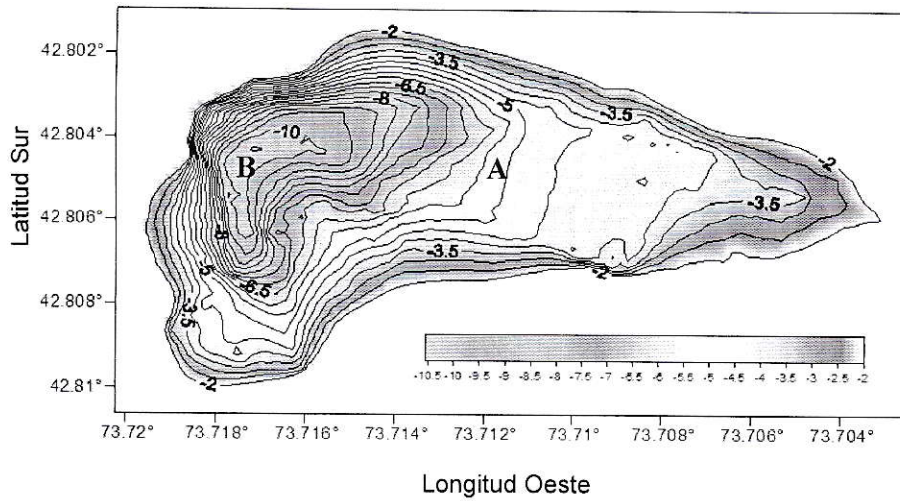


Figura 2. Batimetría de Lago Lepué. Las isolíneas y la escala de gris representan la profundidad respecto al espejo de agua en metros. El eje x indica la Longitud (en grados, el signo negativo es sólo para dar cuenta de la Longitud Oeste) y el eje y la indica la Longitud (en grados). La letra B señala el lugar de donde se tomó el testigo 0201D y la letra A muestra donde se tomaron los testigos 0201A, 0201B y 0201C.

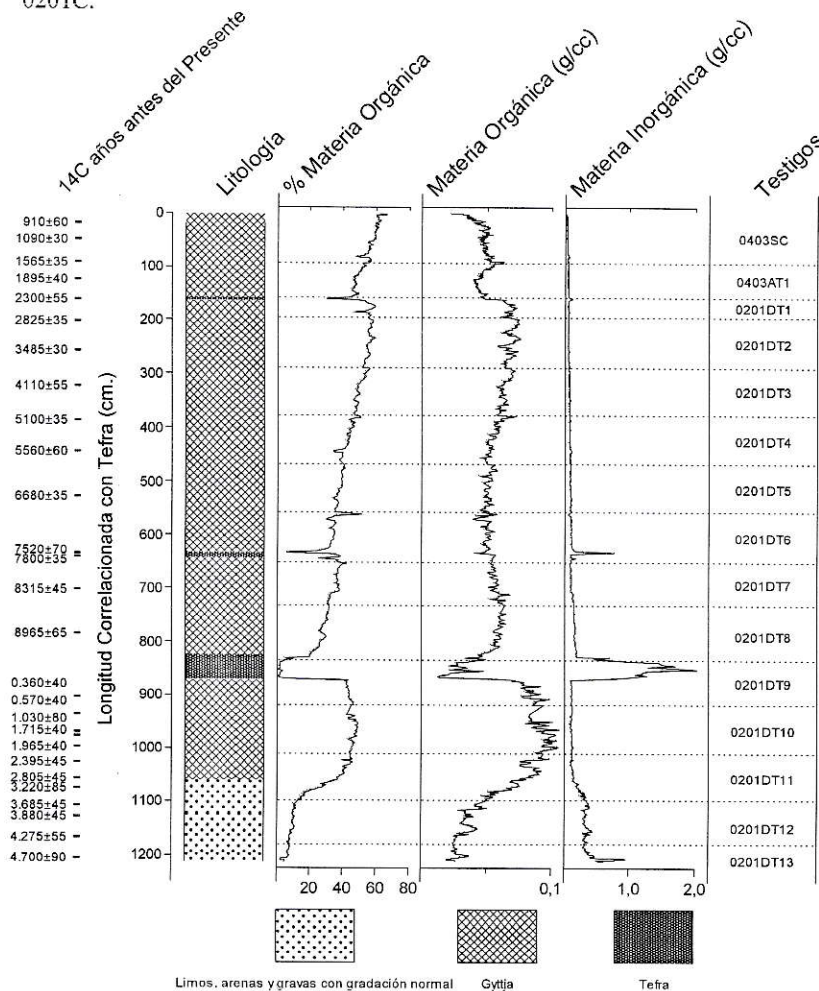


Figura 3. Resultados del análisis de pérdida por ignición del registro completo obtenido de Lago Lepué que incluye los testigos 0403SC, 0403AT1 y 0201D. A la derecha se indica la identidad de los testigos y a la izquierda las dataciones radiocarbónicas con sus respectivos errores (1σ).

4.2. Cronología

La cronología del registro se basa en 27 dataciones radiocarbónicas AMS (Tabla 1, Figura 4), además mediante correlación crono estratigráfica fue posible asignar una edad de 10,9 ka a la tefra de mayor espesor ubicada a una profundidad de 829 cm. El modelo de edad permitió determinar un tiempo deposicional promedio para el registro de 14 años/cm, siendo la resolución temporal promedio del registro de polen de 40 años entre muestras. La edad basal datada corresponde a 17,8 ka.

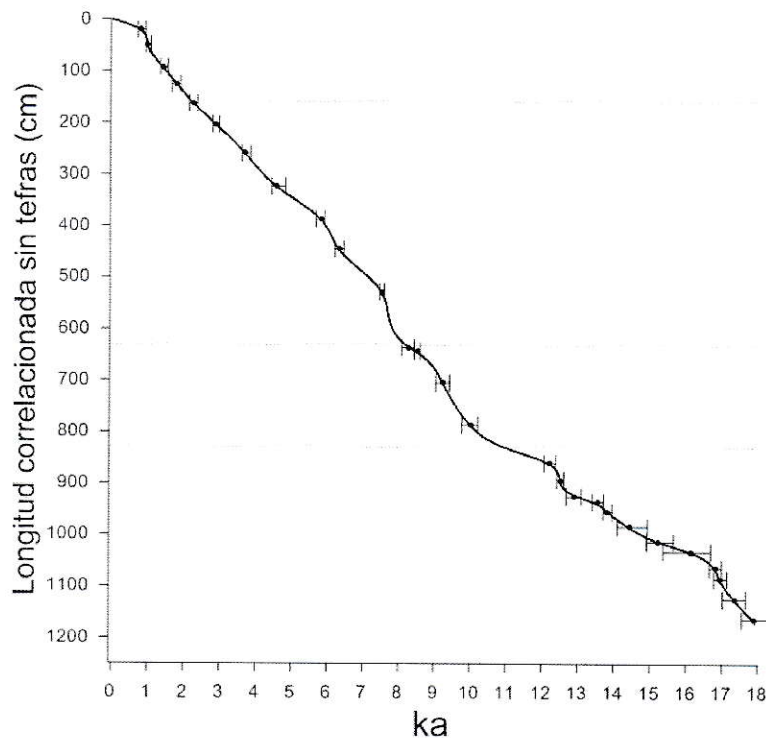


Figura 4. Modelo de edad del registro integrado de Lago Lpeué. El eje y muestra la longitud del testigo correlacionada con tefras y el eje x la edad en ka (miles de años calendario antes del presente). La línea sólida negra representa el modelo de edad y los puntos a las dataciones radiocarbónicas (calibradas a edades calendario AP) con sus respectivos errores (rangos de intercepto a 2σ). Las líneas grises muestran la ubicación de las tefras.

Tabla 1. Dataciones radiocarbónicas obtenidas de los testigos 0403SC, 0403AT1 y 0201D. Las dataciones radiocarbónicas fueron calibradas utilizando el programa CALIB 6.0

Código de Laboratorio	Testigo	Profundidad original con tefras (cm)	Longitud correlacionada con tefras (cm)	Longitud correlacionada sin tefras (cm)	Años ¹⁴ C AP ± 1σ de error	Edad Calibrada (Mediana Años cal. AP)	Intercepto Mín-Máx. (2σ años cal. AP)	Material datado
CAMS -124560	0403SC	991	20	20	910±60	781	681-908	Gyttja
CAMS -124561	0403SC	1020	49	49	1090±30	948	909-1052	Gyttja
CAMS -125907	0403AT1	1064	93	93	1565±35	1.392	1.313-1.517	Gyttja
CAMS -125908	0201DT1	1096	125	125	1895±40	1.776	1.631-1.880	Macrorresto vegetal
ETH-26144	0201DT1	1133	162	162	2300±55	2.235	2.122-2.351	Gyttja
CAMS -125909	0201DT2	1174	203	203	2825±35	2.864	2.775-2.958	Gyttja
CAMS -125910	0201DT2	1230	259	259	3485±30	3.684	3.582-3.827	Gyttja
ETH-26145	0201DT3	1294	323	323	4110±55	4.553	4.415-4.815	Gyttja
CAMS -125911	0201DT4	1358	387	387	5100±35	5.810	5.663-5.904	Gyttja
ETH-26146	0201DT4	1416	445	445	5560±60	6.305	6.184-6.436	Gyttja
CAMS -125912	0201DT5	1500	529	529	6680±35	7.513	7.438-7.572	Gyttja
ETH-25450	0201DT6	1607	636	636	7520±70	8.279	8.065-8.410	Gyttja
CAMS -125913	0201DT6	1614	643	643	7800±35	8.519	8.429-8.592	Gyttja
CAMS -125914	0201DT7	1675	704	704	8315±45	9.244	9.035-9.420	Gyttja
ETH-25451	0201DT8	1757	786	786	8965±65	10.022	9.770-10.221	Gyttja
CAMS -125915	0201DT9	1875	904	860	10.360±40	12.222	12.062-12.394	Gyttja
CAMS -146702	0201DT10	1908	937	893	10.570±40	12.538	12.421-12.618	Gyttja
ETH-26147	0201DT10	1940	969	925	11.030±80	12.913	12.689-13.107	Gyttja
CAMS -125916	0201DT10	1950	979	935	11.715±40	13.562	13.414-13.722	Gyttja
CAMS -146703	0201DT10	1969	998	954	11.965±40	13.823	13.710-13.962	Gyttja
CAMS -146704	0201DT11	1999	1028	984	12.395±45	14.440	14.106-14.934	Gyttja
CAMS -146705	0201DT11	2028	1057	1013	12.805±45	15.218	14.911-15.651	Gyttja
ETH-25453	0201DT11	2047	1076	1032	13.220±85	16.136	15.373-16.693	Gyttja
CAMS -146706	0201DT12	2079	1108	1064	13.685±45	16.826	16.660-16.996	Gyttja
CAMS -125917	0201DT12	2100	1129	1085	13.880±45	16.950	16.781-17.148	Gyttja
CAMS -146707	0201DT12	2139	1168	1124	14.275±55	17.358	17.023-17.667	Gyttja
ETH-25455	0201DT13	2178	1207	1163	14.700±90	17.884	17.558-18.473	Gyttja

4.3. Polen fósil

El registro palinológico de Lago Lepué consta de 417 niveles a partir de los cuales cuantifiqué además el contenido de carbón microscópico. Dividí el registro palinológico en 13 zonas (Figuras 5 y 6) tomando en cuenta los cambios más importantes en la estratigrafía polínica y un análisis de conglomerados CONISS. A continuación describo las zonas, en las cuales indico los tres taxa que presentan mayor porcentaje (en paréntesis se mostrará el promedio porcentual de cada taxon en cada zona) además de una descripción de la variación de los porcentajes polínicos de los taxa presentes en cada zona.

Zona LL-1 (1119-1182 cm; 16,9-17,5 ka). En esta zona *Nothofagus* tipo *dombeyi* presenta el mayor porcentaje en promedio de polen (37 %), acompañado por Poaceae (33,8%) y Ericaceae (14,8%). El polen arbóreo presenta valores cercanos al 20% en la base de esta zona polínica, a partir de 17,5 ka (1182 cm), siendo Poaceae (60%) y Ericaceae (25 %) los taxa con mayor abundancia. Hacia el techo de esta zona Poaceae y Ericaceae disminuyen a ~5%, mientras que *Nothofagus* tipo *dombeyi* incrementa su abundancia a ~80% y alcanza su máxima abundancia en todo el registro a los 16,9 ka, *Misodendron* llega al 17%, *Drimys*, *Escallonia* y *Gunnera* alcanzan, en promedio, 4%. *Blechnum* presenta un importante incremento llegando a 17%. Las microalgas *Botryococcus* (65%) y *Pediastrum* (~30%) presentan

elevados porcentajes en la base de esta zona, disminuyendo posteriormente a 15%, *Isoetes* incrementa su dominancia alcanzando 15%.

Zona LL-2 (1076-1119 cm; 16,1-16,9 ka). Dominan esta zona *Nothofagus* tipo *dombeyi* (49,4%), Poaceae (16,7%) y *Fitzroya/Pilgerodendron* (11,3%). *N.* tipo *dombeyi* declina hasta ~40% a los 16,5 ka y aumenta hacia el techo de la zona alcanzando ~60%. *Fitzroya/Pilgerodendron* incrementa sostenidamente hasta llegar a 23% y *Misodendron* disminuye desde 17% a 5%. Entre 16,5-16,8 ka Poaceae y Ericaceae aumentan hasta 40% y 10%, respectivamente, disminuyendo luego hasta alcanzar su mínimo porcentaje. *Blechnum* alcanza su máxima abundancia del registro en esta zona, con un máximo de 43% a 16,5 ka. *Botryococcus* y *Pediastrum* incrementan su porcentaje a los 16,5 ka, posteriormente disminuyen al 7% hacia el techo de esta zona. *Isoetes* comienza con valores 15% de abundancia y disminuye sostenidamente hasta valores inferiores de 5%.

Zona LL-3 (1028-1074 cm; 14,4-16,1 ka). Dominan esta zona con porcentajes promedio: *Nothofagus* tipo *dombeyi* (37,7%), Myrtaceae (24%) y *Fitzroya/Pilgerodendron* (13,1%). *N.* tipo *dombeyi* experimenta una leve pero sostenida disminución en su porcentaje durante esta zona. Myrtaceae incrementa rápidamente a partir de 16,1 ka al mismo tiempo que Poaceae y *Fitzroya/Pilgerodendron* decaen abruptamente hasta virtualmente desaparecer de manera transitoria. *Raukaua laetevirens*, *Drimys* y *Griselinia* alcanzan su

máxima abundancia en el registro, con porcentajes máximos de 13, 1; 4,1 y 6%, respectivamente. *Misodendron* alcanza un valor promedio de 2,6% mientras Ericaceae, *Blechnum* e *Isoetes* muestran tendencias muy marcadas de descenso hacia sus mínimos de abundancia en el registro.

Zona LL-4 (951-1026 cm; 12,6-14,4 ka). Los taxa dominantes son *Nothofagus* tipo *dombeyi* (34,9%), Myrtaceae (19,9%) y *Podocarpus nubigena* (19,1%). *P. nubigena* incrementa rápida y sostenidamente llegando a ~35%, a la par con disminuciones notables en *Fitzroya/Pilgerodendron*, *N. tipo dombeyi* y Myrtaceae y, en menor grado, *Raukaua laetevirens* y *Drimys*. *Hydrangea* incrementa gradual y sostenidamente mientras *Misodendron* presenta un incremento leve y variable.

Zona LL-5 (890-949 cm; 11,7-12,6 ka). Dominan esta zona *Nothofagus tipo dombeyi* (24, 9%), *Podocarpus nubigena* (24,7 %) y Myrtaceae (18,1 %). Myrtaceae revierte la tendencia a la disminución que predominó durante la zona anterior y repunta alcanzando un máximo de ~30% a los 11,7 ka, acompañada por un sostenido aumento de *Hydrangea*. *Podocarpus nubigena* muestra una clara y constante tendencia al descenso desde 36,4 a 15%. *Tepualia stipularis* presenta un importante incremento y alcanza su máxima abundancia en el registro: 7 % a los 12,3 ka. El resto de los taxa terrestres presentan porcentajes inferiores a 4%.

Zona LL-6 (669-890 cm; 8,9-11,7 ka). Los taxa más abundantes son *Hydrangea* (34,1%), Myrtaceae (19,5%) y *Weinmannia trichosperma* (16 %). *Hydrangea* alcanza su máxima abundancia en todo el registro con 52% a 10,5 ka, momento a partir del cual disminuye gradual y sostenidamente hacia el techo del registro. Myrtaceae muestra un incremento desde ~15% a ~30%, mientras *Nothofagus* tipo *dombeyi* disminuye alcanzando su nivel más bajo del registro (~15%) a la par con *Podocarpus nubigena*, *Fitzroya/Pilgerodendron*, *Drimys*, *Misodendron* y *Tepualia stipularis*. *W. trichosperma* incrementa abruptamente y alcanza un plató muy variable con fluctuaciones entre 20 y 40%, luego disminuye a un plateau en torno a 12%. Durante este lapso *Eucryphia/Caldcluvia* muestra incrementos breves, intermitentes y de baja magnitud (<10%). *Isoetes* incrementa y alcanza sus valores más altos en todo el registro, alcanzando 7% hacia el final de esta zona. *Lophosoria quadripinnata* incrementa su porcentaje alcanzado 3%.

Zona LL-7 (475-669 cm; 6,7-8,9 ka). Los taxa dominantes son *Nothofagus* tipo *dombeyi* (25%), Myrtaceae (17,4%) y *Eucryphia/Caldcluvia* (12,4%). *N.* tipo *dombeyi* y *Misodendron* incrementan sostenidamente, *Podocarpus nubigena* incrementa gradualmente, mientras *Hydrangea*, Myrtaceae, *Isoetes* y *Botryococcus* presentan notables descensos. *Weinmannia trichosperma* presenta una disminución abrupta a los 7,6 ka. A partir de este momento comienza una leve tendencia al incremento de su porcentaje. *Eucryphia/Caldcluvia* aumenta rápidamente y alcanza un plateau en torno a

~15%, contemporáneo con la máxima abundancia de *Lophosoria quadripinnata*.

Zona LL-8 (320-475 cm; 4,5-6,7 ka). Los taxa más abundantes son *Nothofagus* tipo *dombeyi* (39,4%), *Eucryphia/Caldcluvia* (10,6%) y Myrtaceae (10,4%). *N.* tipo *dombeyi* alcanza su máxima abundancia en un plateau (~40%), acompañado con incrementos en *Podocarpus nubigena* y *Drimys winteri*. *Lepidoceras kingii* y *Tepualia stipularis* presentan abruptos incrementos a partir de 6 ka, junto con el comienzo de una tendencia de incremento de *Saxegothaea conspicua*. *Eucryphia/Caldcluvia* y Myrtaceae presentan una clara tendencia a la disminución al igual que *Lophosoria quadripinnata* e *Isoetes*. Poaceae varía en torno al valor promedio de 9,6 %.

Zona LL-9 (270-320 cm; 3,7-4,5 ka). Esta zona está dominada por *Nothofagus* tipo *dombeyi* (34,6%), *Eucryphia/Caldcluvia* (11,7%) y *Weinmannia trichosperma* (11,2%). *N.* tipo *dombeyi* presenta un importante descenso llegando a 17% a los 3,9 ka, mientras que *Eucryphia/Caldcluvia* y *W. trichosperma* aumentan. Myrtaceae presenta valores de porcentaje en promedio al 7% y *Lepidoceras kingii* presenta una abrupta disminución. *Saxegothaea conspicua* continúa un sostenido y gradual incremento al igual que *Podocarpus nubigena*.

Zona LL-10 (180-270 cm; 2,5-3,7 ka). El ensamble *Nothofagus* tipo *dombeyi* (37,2%), Myrtaceae (10%) y *Weinmannia trichosperma* (9%) domina esta zona. *Saxegothaea conspicua* y *Drimys* presentan un sostenido aumento, *Podocarpus nubigena* incrementa levemente mientras que *Eucryphia/Caldcluvia*, *Lepidoceras kingii*, *Lophosoria quadripinnata* e *Isoetes* descienden monotónicamente. Myrtaceae comienza esta zona en 20% y disminuye sostenidamente hasta 10%. Poaceae y la mayoría de los taxa arbóreos muestran escasa variación.

Zona LL-11 (114-180 cm; 1,6-2,5 ka). Los taxa más abundantes son *Nothofagus* tipo *dombeyi* (29,4%), *Weinmannia trichosperma* (13,8 %) y Myrtaceae (10,5%). *N.* tipo *dombeyi* disminuye sostenidamente hasta 13% (2 ka), volviendo a incrementar al término de la zona. *W. trichosperma* mantiene su incremento sostenidamente hasta alcanzar 33%, de igual manera ocurre con Myrtaceae, *Tepualia stipularis* y *Drimys* que aumentan hacia el final de la zona. *Saxegothaea conspicua* alcanza su valor máximo (18%) en el registro a 2,1 ka, luego disminuye sostenidamente. *Lepidoceras kingii* presenta nuevos picos de incremento e *Isoetes* aumenta a 1,1 %.

Zona LL-12 (50-114 cm; 0,95-1,6 ka). Los taxa con mayor abundancia son *Nothofagus* tipo *dombeyi* (34,8%), Myrtaceae (10,6%) y *Weinmannia trichosperma* (10,4%). En esta zona *N.* tipo *dombeyi*, *Saxegothaea conspicua*, *Podocarpus nubigena* y *Fitzroya/Pilgerodendron* (este último, levemente)

continúan su tendencia al aumento hacia el presente. Poaceae varía en torno al valor promedio de 6%. *W. trichosperma* disminuye abruptamente, mientras que *N.* tipo *dombeyi*, *Saxegothaea conspicua*, *Podocarpus nubigena* y *Fitzroya/Pilgerodendron* presentan una leve tendencia al aumento hacia el presente. *Isoetes* sin embargo, incrementa y se mantiene hasta el presente en promedio al 5% (aunque presenta un pico de incremento de porcentaje al final de esta zona).

Zona LL-13 (0-50 cm; 0-0,95 ka). Los taxa más abundantes son *Nothofagus* tipo *dombeyi* (38,2%), *Weinmannia trichosperma* (12,8%) y *Saxegothaea conspicua* (9,8%). A partir de 0,8 ka *N.* tipo *dombeyi*, *Drimys*, *Saxegothaea conspicua* y Myrtaceae aumentan hacia el presente mientras que *W. trichosperma* incrementa. El resto de los taxa no presentan mayores variaciones respecto a lo ocurrido en las zonas anteriores.

4.4. Registro de carbón

El registro de carbón de Lago Lapeúe presentado en tasas de acumulación (partículas /cm² x año) de las partículas micro y macroscópicas de carbón (Figura 7) muestra el siguiente patrón de cambio:

- Picos discretos de carbón entre 16-17,5 ka. El registro de partículas microscópicas de carbón presenta la magnitud de las señales mucho mayor que en el registro de partículas macroscópicas.

- Picos conspicuos de carbón microscópico a los 12,6 ka, mientras que el registro de partículas macroscópicas de carbón este pico es de magnitud relativa mucho menor.
- Persistentemente altos valores de carbón a partir de 11 ka, los cuales finalizan abruptamente a los 8,5 ka en ambas clases de tamaño.
- Picos de carbón a los 7,5 y 4,2 ka. Alta abundancia de carbón entre 0,8-2,4 ka. El carbón macroscópico incrementa sostenidamente hasta alcanzar su máxima abundancia a los 0,8 ka, mientras que el registro de partículas microscópicas de carbón muestra un pico a los 2,4 ka luego una secuencia de picos de baja magnitud, finalizando con un pico de gran magnitud de edad 0,8 ka.

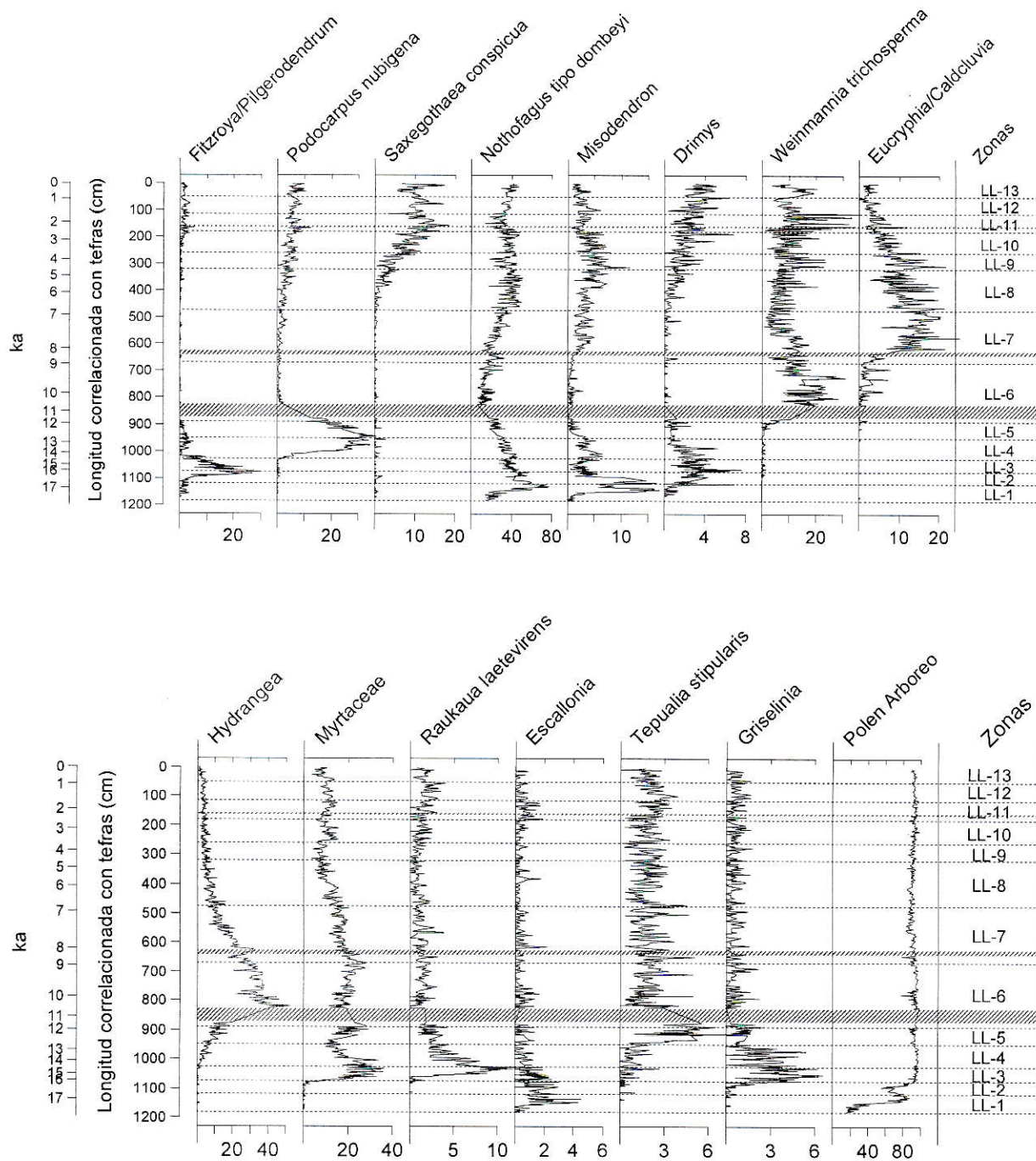


Figura 5. Diagramas de porcentaje de polen de los principales taxa arbóreos. Las líneas segmentadas horizontales demarcan las zonas polínicas. El eje Y principal corresponde a la longitud correlacionada con tefra, mientras que el eje Y secundario corresponde a la edad en ka.

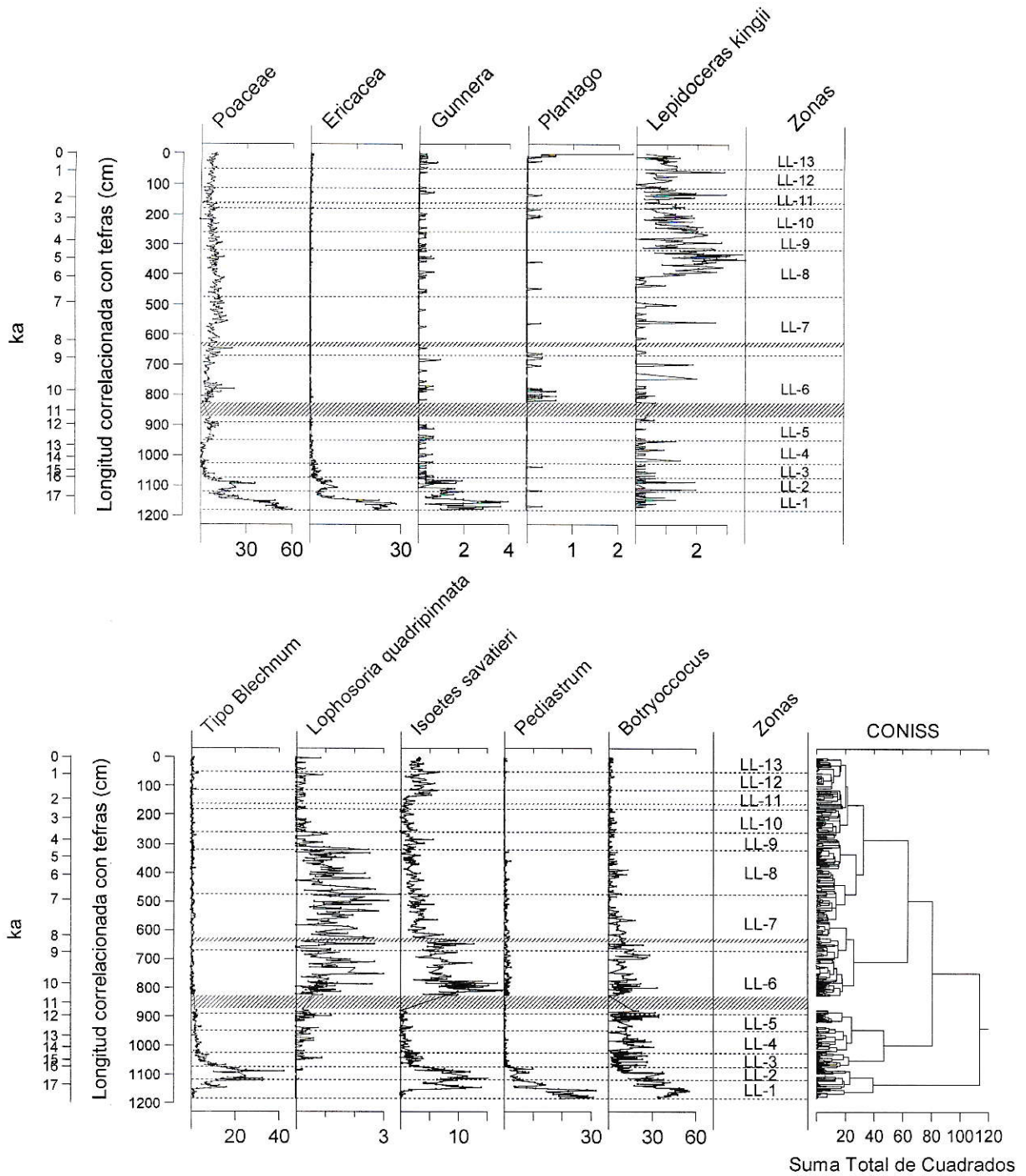


Figura 6. Diagrama de porcentaje polen que muestra los taxa herbáceos, helechos, acuáticas y exóticas. Se muestra la suma arbórea y el análisis CONISS. El eje Y principal corresponde a la longitud correlacionada con tefra, mientras que el eje Y secundario corresponde a la edad en ka.

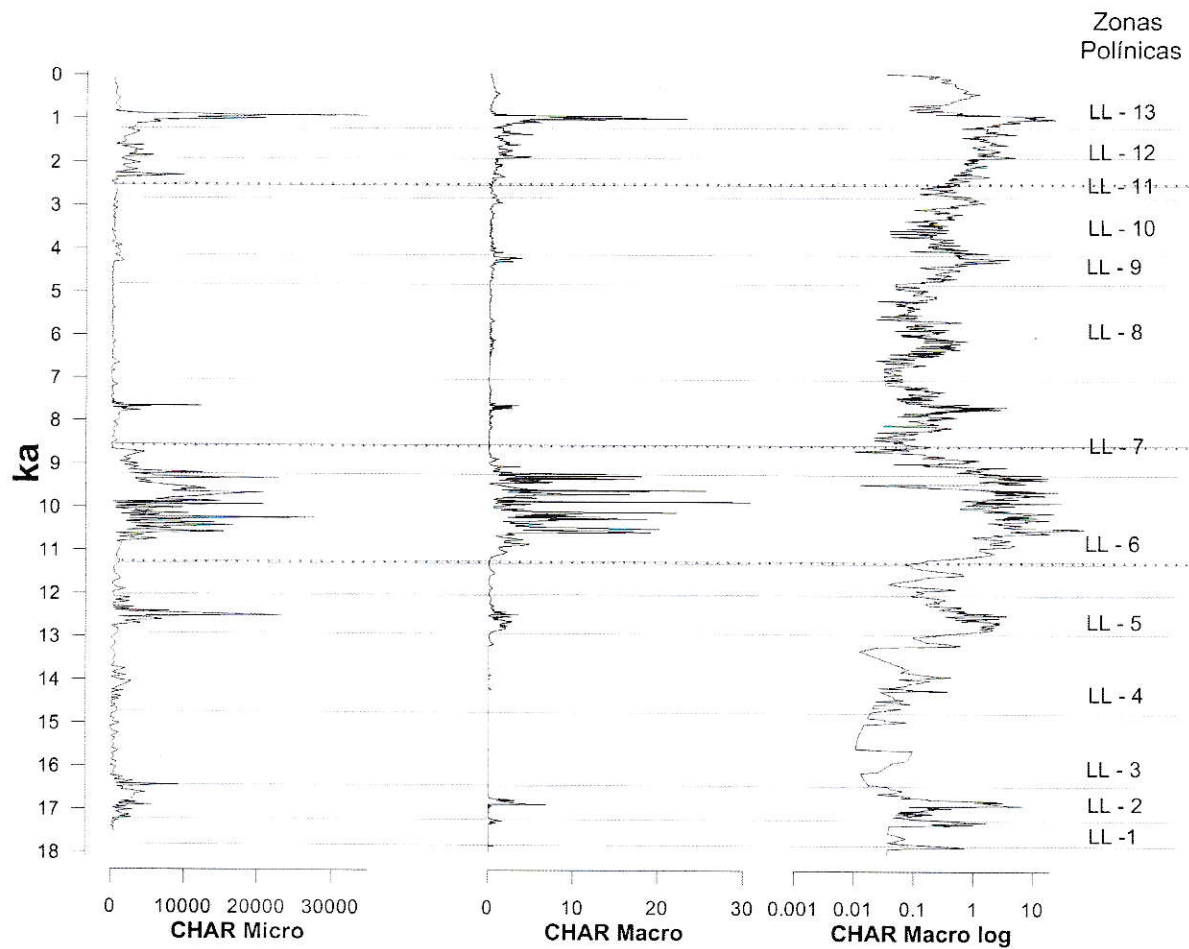


Figura 7. Tasas de acumulación de partículas micro y macroscópicas de carbón de Lago Lepué, junto con las zonas polínicas. Las tefras se muestran en líneas suaves discontinuas de color gris. El eje Y corresponde a la edad en ka, mientras que el eje X corresponde a la tasa de acumulación de carbón (CHAR, Partículas $\times \text{cm}^{-2} \times \text{año}^{-1}$)

5. Discusión

5.1. Estratigrafía y cronología

Las múltiples líneas de evidencia indican sedimentación lacustre pelágica in-situ ininterrumpida a lo largo de todo el registro de Lago Lepué a partir de 17,8 ka. Detectamos tres niveles piroclásticos ubicados en los centímetros 159 (2,2 ka), 626 (8,2 ka) y 828 (10,9 ka) cm de longitud del testigo. El tramo basal, entre 1182-1211 cm, contiene limos, arenas y gravas con gradación normal.

El modelo de edad de Lago Lepué indica un tiempo deposicional promedio (años/cm) de 14,8 años/cm (desviación estándar: 9,6 años/cm; mediana: 13 años/cm; valor máximo: 46,3 años/cm; valor mínimo: 0,82 años/cm).

Al comparar la estratigrafía y cronología de Lago Lepué con los resultados publicados de Lago Melli y Tahui se aprecian diferencias estratigráficas: en Lago Lepué se identificaron tres tefras, mientras que en los lagos Melli y Tahui sólo se encontraron la tefra datada en 10,9 ka, y la tefra datada en 8,2 ka. En Lago Tahui, la tefra depositada a los 8,2 ka fue interpolada mediante el uso del modelo de edad. La tercera tefra, la más somera, no se detectó en los

lagos Melli y Tahui. Las 27 dataciones realizadas en el registro de Lago Lepué permiten tener un mejor control cronológico que en los registros obtenidos de Lago Melli, con 13 dataciones y Lago Tahui con 12 dataciones (Figura 8).

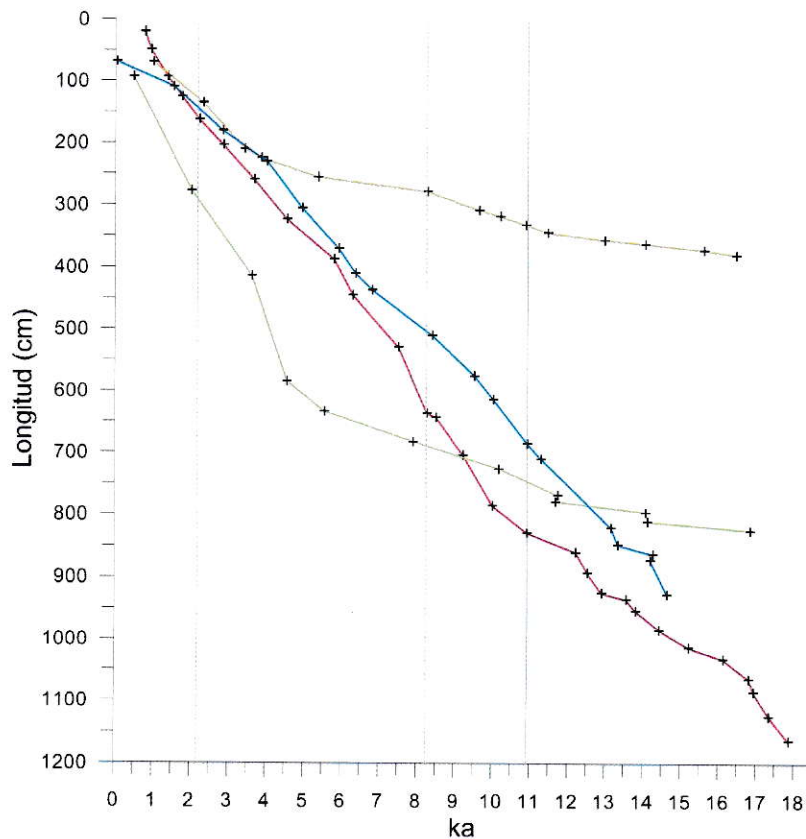


Figura 8. Comparación entre las dataciones de los distintos sitios estudiados. En rojo, se observan las dataciones realizadas para Lago Lepué, en azul, las dataciones de Lago Condorito, en verde las dataciones de Lago Tahui y en café las dataciones de Lago Melli. El eje X muestra la edad en ka (miles de años antes del presente) y el eje y muestra la longitud en cm. Las tefras se muestran como las líneas verticales grises.

5.2. Registro de polen

El registro polínico de Lago Lepué provee una serie temporal continua y de alta resolución de cambios vegetacionales en torno al lago desde 17,8 ka. Si bien existe un dominio prácticamente constante del bosque templado lluvioso, las variaciones en la composición y dominancia de los diferentes taxa sugieren tendencias de cambio de temperatura y precipitación que permiten inferir cambios pasados del clima.

El registro comienza con predominio de Poaceae, *Gunnera* y Ericaceae con escasa abundancia de *Nothofagus* tipo *dombeyi* entre 16,9-17,5 ka, lo que sugiere un paisaje abierto bajo condiciones frías. Un incremento sostenido de la planta acuática *Isoetes* sugiere niveles lacustres bajos. La distribución de este taxon acuático en el gradiente batimétrico tiene estrecha relación con las variaciones en el nivel lacustre, debido a que es una planta acuática que habita entre los 30 cm y 4 m de profundidad (García & Ballesteros 1996, Gosling y col., 2008, Alfaro-De La Torre & Tessier 2002), por lo tanto, el incremento en el porcentaje de *Isoetes* permite inferir disminución en el nivel lacustre, mientras que su disminución da cuenta de aumento del nivel lacustre. Como el registro de Lago Lepué informado en esta tesis se obtuvo de la zona con mayor profundidad del lago, esto permite documentar cambios en la vegetación cuando ocurren fases regresivas lacustres, debido a que hay migración lateral y vertical de los ambientes litorales, ocurriendo

desplazamientos de la vegetación asociada a estos ambientes litorales.

Posteriormente *Nothofagus* tipo *dombeyi* y *Misodendron* presentan un pico de máxima abundancia a los 16,9 ka, luego un aumento gradual hacia 16,1 ka.

También aumentan entre 16,1-16,9 ka *Fitzroya/Pilgerodendron* y *Drimys* marcando el inicio del establecimiento y predominio de bosques con grados importantes de apertura inferido además por la presencia de *Blechnum*, los cuales son taxa intolerantes y semitolerantes a la sombra (Villagrán 1985).

Isoetes disminuye sostenidamente en, sugiriendo un aumento del nivel lacustre.

El registro muestra disminuciones en *Fitzroya/Pilgerodendron* y *Nothofagus* entre 14,2-16,1 ka, junto con la aparición de *Raukaua laetevirens*, *Hydrangea* y *Myrtaceae*, estos últimos taxa en su mayoría tolerantes a la sombra (Donoso y col. 2006, Villagrán 1985) con una distribución en la actualidad asociado a un clima templado, lo cual sugiere el establecimiento de un bosque Nordpatagónico con un mayor grado de cobertura y un incremento en la temperatura respecto al periodo anterior. Posteriormente, incrementa *Podocarpus nubigena* y disminuye *Myrtaceae* a los 14,3 ka. Actualmente *Podocarpus nubigena* habita en sectores del paisaje con condiciones más frías que la mayoría de los taxa incluidos en el palinomorfo *Myrtaceae* (Donoso y col. 2006, Villagrán 1988), sugiriendo un descenso en la temperatura. A los 12,6 ka *Podocarpus nubigena* alcanza valores máximos de porcentaje y posteriormente se revierte parcialmente esta situación con un incremento del

porcentaje de Myrtaceae y disminución de *Podocarpus nubigena* entre 11,7-12,6 ka. Entre 10,9-11,7 ka disminuyen abruptamente *Podocarpus nubigena* y *Nothofagus* tipo *dombeyi*, mientras que *Hydrangea* y *Weinmannia trichosperma* inician incrementos sustanciales. En este momento, *Hydrangea* y *Weinmannia trichosperma*, siendo taxa semi-tolerante e intolerante a la sombra respectivamente y con resistencia a la sequía, sugieren el establecimiento de condiciones con menor precipitación y aumento en la temperatura respecto a lo ocurrido anteriormente.

A partir de 10,9 ka Myrtaceae disminuye, *Nothofagus* tipo *dombeyi* alcanza sus valores más bajos de porcentaje en el registro y se observa: (i) un abrupto aumento de *Isoetes*, taxon acuático cuyo incremento interpreto como aumento del nivel lacustre; (ii) *Hydrangea*, que actualmente presenta una amplia distribución latitudinal, presenta su máximo porcentaje en este momento, taxon parcialmente tolerante a la sombra que suele ocupar sectores de margen de bosque, asociado a condiciones templadas de temperatura (Villagrán, 1985), y (iii) el inicio de un importante incremento de *Weinmannia trichosperma*, taxon pionero, sombra intolerante y resistente a veranos con disminución de la precipitación. Todos estos cambios señalan condiciones de menor precipitación y un aumento de temperatura respecto al periodo anterior, el cual estuvo dominado por taxa resistentes al frío y con altos requerimientos de humedad asociados al bosque Norpatagónico. A partir de 9,9 ka comienza a incrementar de manera intermitente y errática *Eucryphia/ Caldcluvia*, taxon

termófilo indicador del bosque Valdiviano, reafirmando la tendencia hacia condiciones de menor precipitación y aumento de temperatura. *Eucryphia/ Caldcluvia* aumenta abruptamente a partir de 8,2 ka mientras *Isoetes* permanece con porcentajes altos aunque de menor magnitud al intervalo 8,2-10,9 ka, sugiriendo un parcial aumento en el nivel lacustre respecto al momento anterior. Posteriormente, el aumento de los taxa de bosque Norpatagónico *Nothofagus* tipo *dombeyi*, *Podocarpus nubigena* y *Drimys*, actualmente asociados a regiones con mayor precipitación y menor temperatura que los taxa de bosque Valdiviano, sugieren un incremento en la precipitación y disminución de la temperatura a partir de 7,8 ka. Además, en este momento *Isoetes* comienza a disminuir sus porcentajes de manera gradual y sostenida, permitiendo inferir un aumento en el nivel lacustre ocasionado por el incremento en las precipitaciones. *Hydrangea* también disminuye sostenidamente, sugiriendo una mayor continuidad y/o cobertura del bosque. *Eucryphia/ Caldcluvia* se mantiene estable en un plateau entre 6,5-7,8 ka, comenzando un sostenido descenso hasta 2,1 ka, interrumpido por un breve y abrupto incremento a los 4,3 ka. *Saxegothea conspicua*, que actualmente se encuentra distribuido entre la región del Maule y la región de Aysén, siempre asociado a condiciones de alta humedad (Donoso y col. 2006), incrementa entre 2,1-6,7 ka; esta especie se distribuye en áreas del sur de Chile bajo condiciones de frío y humedad, reafirma la tendencia que comenzó hace 7,8 ka con el incremento de taxa de bosque Norpatagónico hacia condiciones de menor temperatura y aumento en las precipitaciones.

A partir de 2,1 ka se observa un período de alta variabilidad en las tendencias de los distintos taxa. Las tendencias generales de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, *Podocarpus nubigena* y *Drimys* presentan un sostenido incremento hacia el presente, mientras que *Hydrangea*, *Eucryphia/ Caldcluvia*, *Raukaua laetevirens*, *Tepualia stipularis* y Myrtaceae disminuyen. Estos taxa actualmente se distribuyen en bosques templados, mientras que *Nothofagus* tipo *dombeyi*, *Podocarpus nubigena* y *Drimys* se distribuyen en bosques que habitan bajo condiciones de frías temperatura (Donoso y col. 2006), particularmente *Podocarpus nubigena* y *Drimys* presentan tolerancia a ambientes inundados, lo que me sugiere que en este momento ocurrió un aumento en las precipitaciones y disminución de la temperatura.

Importantes cambios ocurren a los 2,4; 1,2 y 0,8 ka en los cuales *Saxegothaea conspicua* varía en antifase respecto a *Nothofagus* tipo *dombeyi* y *Weinmannia trichosperma*. Debido a que *Saxegothaea conspicua* actualmente se distribuye en ambientes fríos y húmedos (Donoso y col. 2006); *Nothofagus* tipo *dombeyi* presenta resistencia a la disminución de las precipitaciones y *Weinmannia trichosperma* presenta una menor tolerancia al frío (Donoso y col. 2006), además de señalar algún grado de perturbación en el bosque en este momento, la variación entre estos taxa me permite inferir cambios en las precipitaciones y temperatura a escalas de tiempo submilencial - centenal entre 0,8 y 2,4 ka.

El parámetro tasas de cambio muestra valores altos en los siguientes momentos: 17; 16,5; 16; 14,3; 13,8; 12,5; 11,3; 10,9; 9,2; 8,8; 7,8; 6,5; 5,7; 5,5; 4,4; 3,9; 3,4; 2,5 y 1 ka. Estos altos valores sugieren cambios abruptos y de gran magnitud en la vegetación, los que coinciden con transiciones importantes en el registro polínico (Figura 9):

- El cambio desde el dominio de una vegetación herbácea hacia una vegetación arbórea a los 17 ka.
- Un incremento de *Fitzroya/ Pilgerodendron*, taxon resistente al frío y que habita en condiciones de alta humedad, evidencia condiciones frías y húmedas a los 16,5 ka.
- Un incremento de Myrtaceae a los 16 ka, indicativo de un pulso de calentamiento.
- Un rápido incremento de *Podocarpus nubigena* y descenso de taxa relativamente termófilos a partir de 14,3 ka, evidencian un pulso de enfriamiento e incremento de precipitación.
- Un descenso de *Podocarpus nubigena* a partir de 12,5 ka a la par con incremento de mirtáceas e *Hydrangea* sugieren descenso de precipitaciones en contexto de condiciones templado-frías.
- Elevados porcentajes de *Hydrangea* y *Weinmannia trichosperma* y valores mínimos de *Nothofagus tipo dombeyi* y *Podocarpus nubigena*, señalan el cambio desde un bosque frío y húmedo, a un bosque más templado y seco con mayor grado de apertura a partir de los 10,9 ka. El incremento de *Weinmannia*

trichosperma da cuenta de un incremento en el grado de perturbación del bosque en este momento.

- Incremento en *Nothofagus* tipo *dombeyi* y Myrtaceae, indica un incremento de precipitaciones a partir de los 9,2 ka.

- Leve incremento en *Eucryphia/Caldcluvia* a los 8,8 ka, indicando una condición de menor precipitación y alta temperatura.

- Incremento de taxa de bosque Norpatagónicos, indicando el aumento de las precipitaciones y disminución de la temperatura a partir de los 7,8 ka.

- Incremento *Nothofagus* tipo *dombeyi* dando cuenta de un aumento en las precipitaciones a partir de los 6,5 ka.

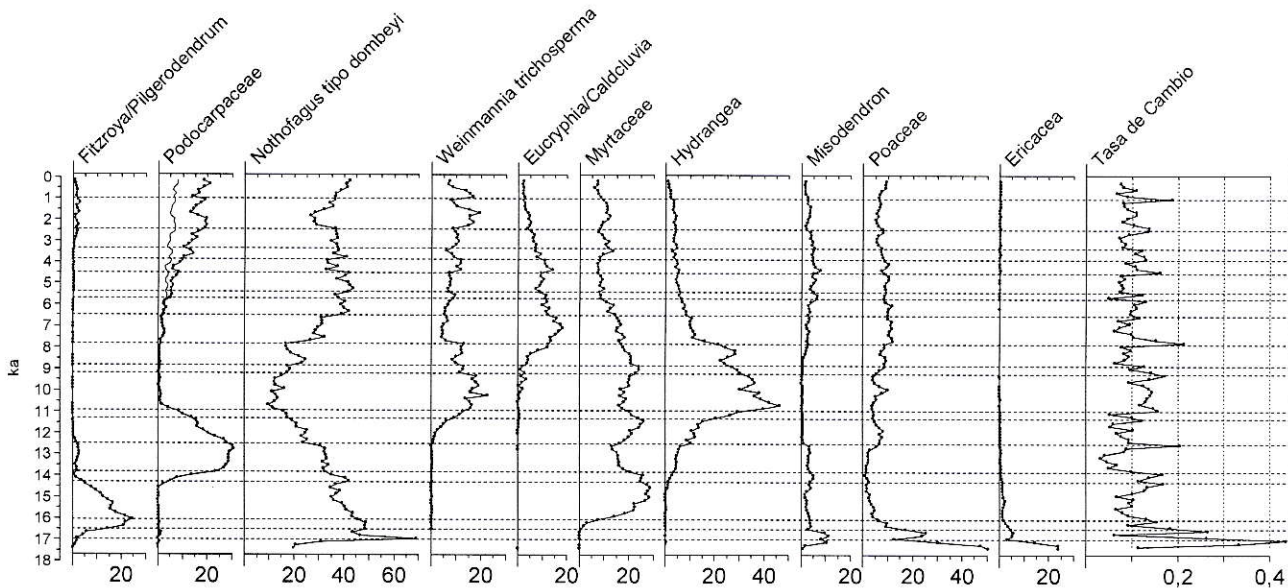


Figura 9. Diagrama realizado con porcentajes de taxa polínicos terrestres seleccionados, suavizados con una media móvil de 5 muestras e interpolados utilizando una ventana temporal de 150 años. En la columna de la derecha se muestran los resultados del análisis de tasa de cambio del registro de Lago Lepué. Las líneas segmentadas horizontales muestran los momentos de mayor valor del parámetro de tasa de cambio, y las líneas segmentadas verticales de la columna derecha muestran la separación entre decimales del valor del parámetro de tasa de cambio.

- Incremento de *Weinmannia trichosperma* y disminución de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, evidenciando un descenso en las precipitaciones a los 5,7 ka.
- Incremento de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, señalando el aumento de las precipitaciones a partir de los 5,5 ka.
- Incremento de *Eucryphia/Caldcluvia* y disminución de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, señalan la ocurrencia de un pulso de calentamiento y la disminución de las precipitaciones a los 4,4 ka.
- Disminución de *Eucryphia/Caldcluvia* e incremento de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, señalando el aumento en las precipitaciones y la disminución de la temperatura a los 3,9 ka.
- Sostenido incremento de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, señalando una intensificación en el aumento de las precipitaciones a partir de los 3,35 ka.
- Disminución de *Nothofagus* tipo *dombeyi* e incremento *Podocarpus nubigena* y *Saxegothaea conspicua*, dando cuenta de una intensificación de las precipitaciones y del descenso de la temperatura a los 2,45 ka.
- Dominio de taxa de bosque Norpatagónico a partir de 1 ka.

5.3. Fuego y clima

El registro de carbón muestra poca o casi nula depositación de partículas de carbón entre 12-17, 5 ka, excepto por discretos picos de acumulación de carbón entre 16-17,5 ka, evidenciando una baja ocurrencia de fuego, lo cual ocurre en momentos en que en el registro palinológico muestra vegetación

asociada a condiciones frías y húmedas. Posteriormente, alta abundancia de carbón entre 8,5-12 ka implica una elevada y recurrente actividad de fuego, en instantes en que se infiere una disminución en las precipitaciones y aumento en la temperatura respecto al lapso precedente.

Entre 2,4-8,5 ka se registra baja abundancia de partículas de carbón, sugiriendo nula o muy baja ocurrencia de paleofuegos, con la excepción ocurre de un incremento puntual a los 4,2 ka. Esta baja ocurrencia de paleofuegos coincide con inferencias palinológicas de incremento en las precipitaciones. La acumulación de carbón comienza a aumentar a partir de 2,4 ka alcanzando un máximo a 1 ka, lo que es interpretable como una disminución en las precipitaciones lo que ocasionó un aumento en las sequías, que ocasiona mayor disponibilidad de combustible seco y aumento en la ocurrencia de fuego. A continuación se aprecia un descenso abrupto de carbón, lo que sugiere disminución de paleofuegos, probablemente asociado un aumento en las precipitaciones.

Al comparar los registros de partículas microscópicas y macroscópicas de carbón (Figura 7) entre sí no se observan grandes diferencias en las tendencias de cambio, indicando por lo tanto que la señal regional y local registrada en Lago Lepué muestra el mismo patrón de ocurrencia de fuego a escala multimilenial que se ha descrito a nivel regional (Heusser 1994, 2003, Moreno

2000, Abarzúa & Moreno 2008) y sub-continental (Whitlock y col., 2007; Power y col., 2008).

5.4. Fuego y vegetación

El registro de Lago Lepué (Figura 10) muestra variación en antifase entre la ocurrencia de fuego (expresado como el logaritmo de la tasa de acumulación de carbón macroscópico) versus la abundancia de *Nothofagus* tipo *dombeyi* entre 16-17,5 ka; 11-8,5 ka y 0,8-2,4 ka. Una relación distinta se aprecia en *Weinmannia trichosperma*, el cual varía en fase con carbón, sugiriendo una asociación causal (Figura 10). Estudios previos han dado cuenta de la variación de esta especie en respuesta a la perturbación asociada a la ocurrencia de fuego (Abarzúa & Moreno 2004). A escalas de tiempo multimilenial se observa covariación entre el taxon acuático *Isoetes* y las tasas de acumulación de carbón macroscópico (Figura 10). La variación en fase de *Isoetes* con la acumulación de carbón entre 16-17,5 ka; 11-8,5 ka y 0,8-2,4 ka, muestra que la ocurrencia de fuego ocurre en instantes en que el nivel del lago disminuyó, lo que sugiere menores aportes de precipitación al área de estudio.

Las variaciones en la precipitación, documentadas en el registro por *Nothofagus* tipo *dombeyi*; los eventos de perturbación evidenciados por

Weinmannia trichosperma y los cambios en el nivel lacustre inferido por las variaciones de *Isoetes* asociados a la acumulación de carbón entre 16-17,5 ka;

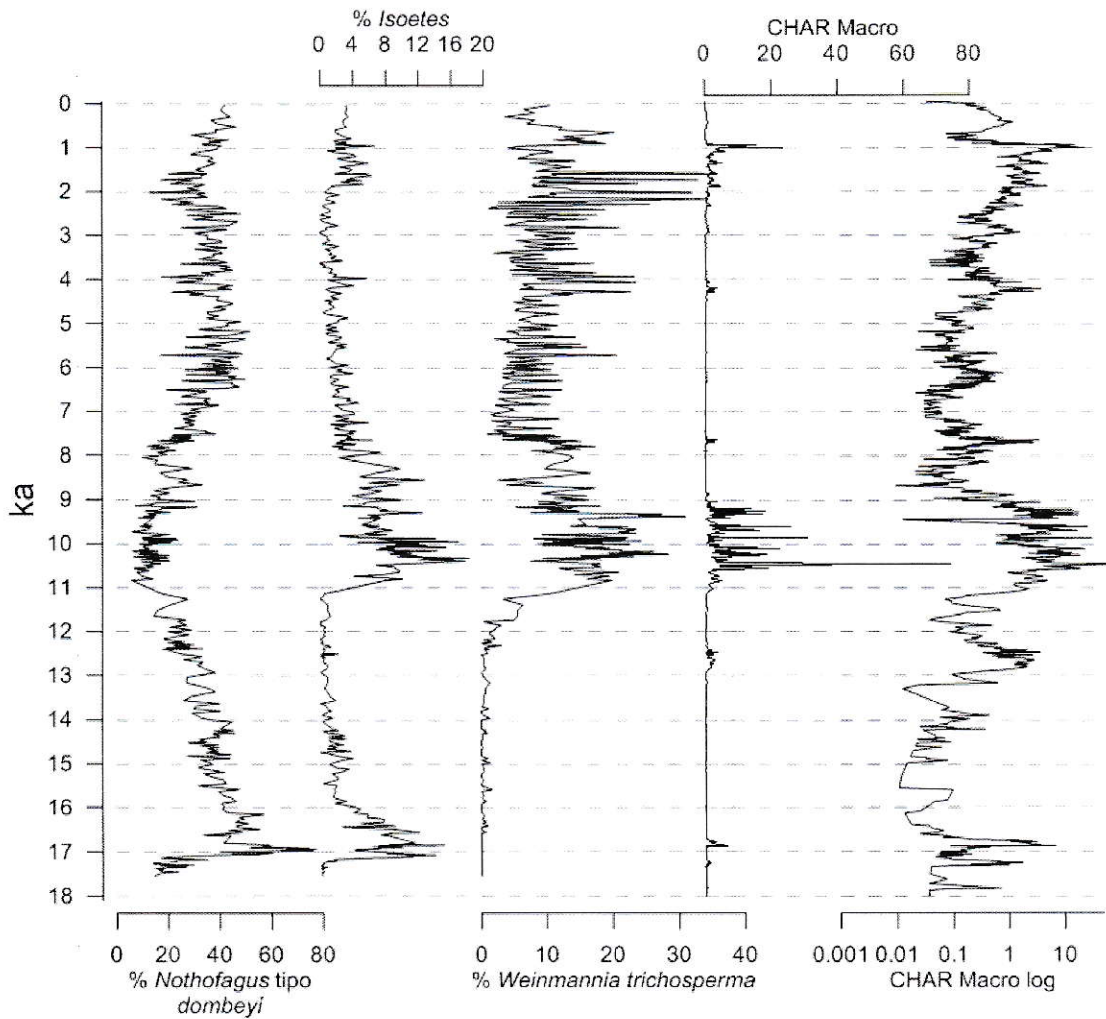


Figura 10. Comparación entre % de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, % *Isoetes*, % *Weinmannia trichosperma*, la tasa de acumulación de partículas macroscópicas de carbón (CHAR) y Log CHAR de Lago Lepué. En el eje X se indican los porcentajes de cada taxa, CHAR y el log CHAR, mientras que el eje Y corresponde a la edad en ka.

11-8,5 ka y 0,8-2,4 ka, permiten asociar el cambio vegetacional relacionado con variaciones en las precipitaciones ocasionadas por los vientos del oeste, perturbaciones relacionadas con paleofuegos y variaciones en el nivel lacustre, con el patrón de variaciones en los vientos del oeste que subyace a la ocurrencia de fuego escalas de tiempo milenial - submilenial en Lago Lepué.

5.5. Comparación con otros sitios

Lago Lepué (42°48'28.7"S -73°43'4.8"O) se encuentra muy cercano a los sitios palinológicos Lago Melli y Tahui (42°46'S, 73°33'O, a ~14,1 km de, Abarzúa y col., 2004; 42°50'S, 73°30'O, ~18 km, Abarzúa & Moreno 2008), lo que permite realizar comparaciones de las variaciones en la vegetación y ocurrencia de fuego a nivel de paisaje en esta zona de Isla Grande de Chiloé. Además realizaré comparaciones con Lago Condorito, sitio ubicado en la Región de los Lagos, en las cercanías de Puerto Montt (41°45'S, 73°07'O, ~130 km, Figura 1). Las comparaciones se centrarán en los registros de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, *Eucryphia/Caldcluvia*, *Podocarpus nubigena*, *Saxegothaea conspicua* y *Weinmannia trichosperma*. Considerando la zonación actual de la vegetación inducida por gradientes climáticos en este sector de la Patagonia, es posible interpretar a *Nothofagus* tipo *dombeyi* como un taxon hidrófilo, *Eucryphia/Caldcluvia* como un taxon termófilo, *Podocarpus nubigena* y *Saxegothaea conspicua* como indicadores de

condiciones relativamente frías y húmedas, mientras que *Weinmannia trichosperma* puede considerarse como indicador de perturbaciones.

Las diferencias de edad en las que ocurren las variaciones vegetacionales observadas entre los registros obtenidos de lagos Lepué, Melli y Tahui se pueden atribuir a las diferencias entre las cronologías de los sitios, debido a que los lagos Melli y Tahui presentan un menor número de dataciones radiocarbónicas que Lago Lepué, teniendo un menor control cronológico de los cambios documentados en estos sitios. Además, la interpolación de la tefra de 8,2 ka en Lago Tahui, y la ausencia de la tefra más somera en los registros de Lago Melli y Tahui, da cuenta que estos registros no poseen la continuidad estratigráfica que posee Lago Lepué y por lo tanto, el control cronológico y estratigráfico en los registros de Lago Melli y Tahui es insuficiente e inferior a lo obtenido en Lago Lepué. Las diferencias entre los registros de Lago Lepué y Lago Condorito pueden ser explicadas por la gran distancia que separa a estos lagos. Además, la diferencia entre las magnitudes del incremento en los porcentajes de polen entre el registro de Lago Lepué y el resto de los sitios de Patagonia noroeste, es adjudicable a diferencias en la superficie y profundidad: Lago Condorito, Melli y Tahui, presentan menor profundidad y menor superficie (Lago Condorito: 2,7 m, < 1 ha; Lago Melli: 5 m, ~9 ha; Lago Tahui: 2,4 m, ~9 ha) mientras que Lago Lepué, con 10 metros de profundidad y ~376 ha, presenta un área de captación de polen mayor y una mayor profundidad, lo que disminuye el impacto a los regímenes

de perturbación ambiental, como la menor precipitación y descenso en el nivel lacustre, factores que perturban la sedimentación y el área de captación de polen. Es posible que Lago Condorito, Melli y Tahui se vieran afectados severamente por el momento de menor precipitación y mayor temperatura ocurridos entre 7,6 y 11 ka (Moreno 2004, Abarzúa y col., 2004, Abarzúa & Moreno 2008), provocando descenso de los niveles lacustres, que ocasionó que estos lagos sensaran lo que ocurría en su entorno de manera local debido a que variaron su ambiente deposicional, redujeron en extremo el área del lago lo que promovió la colonización del bosque en sectores antes ocupados por agua, además de una reducción del área de captación de polen y volverse extremo someros. Evidencia de esto, es lo ocurrido en Lago Tahui, en donde se obtuvieron evidencias de regresiones lacustres en el registro obtenido (Abarzúa y col. 2004). Si bien esto también ocurrió en Lago Lepué, no afectó la sedimentación lacustre en el sector más profundo del lago, obteniéndose un registro continuo en un mismo ambiente deposicional a partir del último máximo glacial.

Nothofagus tipo *dombeyi*

Nothofagus tipo *dombeyi* aparece en el registro de Lago Lepué desde la base, a partir de los 17,5 ka, con 14 % de abundancia. A los 16,9 ka alcanza 77,3 %, su máximo porcentaje en todo el registro, y disminuye sostenidamente entre 10,8-16,2 ka. En el registro de Lago Melli este taxon muestra máxima

abundancia entre 16-17 ka, luego desciende a valores cercanos a cero y permanece así hasta el presente. El registro de Lago Tahui comienza con un pico de *Nothofagus* tipo *dombeyi* entre 16-17 ka y a continuación desciende a valores cercanos a 0%. Lago Condorito muestra altos valores al comienzo del registro, entre 13-15 ka. A continuación los registros de Lago Lepué y Lago Condorito muestran la misma estructura multimilenial de cambio: Lago Condorito presenta disminución de porcentaje entre 12-13 ka, manteniéndose con valores mínimos entre 7,8-12 ka. Lago Lepué presenta valores mínimos de porcentaje entre 9-10,8 ka, con un leve y transitorio aumento entre 9-8 ka. A partir de 7,8 ka ambos sitios muestran un sostenido incremento y alcanzan un plateau entre ~2,5-6 ka, con un marcado descenso en ~4 ka. A partir de ~2 ka los registros divergen, Lago Lepué presenta una tendencia al incremento de *Nothofagus* tipo *dombeyi*, mientras que Lago Condorito disminuye (Figura 11).

En Lago Lepué las tendencias de cambio de *Nothofagus* tipo *dombeyi* son más graduales, mientras que en Lago Condorito ocurren más abruptamente, infiriéndose diferencias en la respuesta de *Nothofagus* tipo *dombeyi* atribuibles a las diferentes características que presentan los dos lagos.

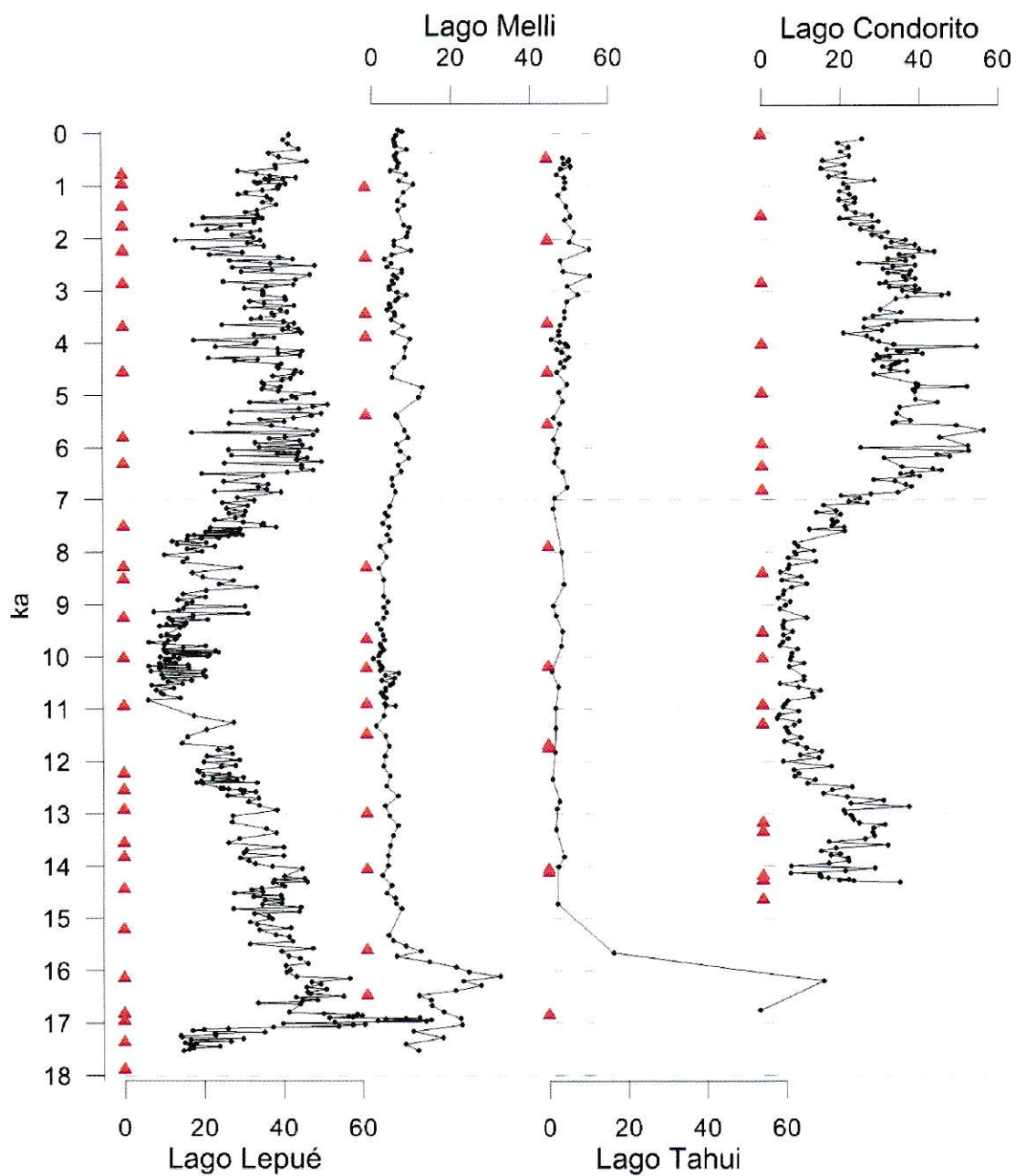


Figura 11. Comparación entre sitios, porcentaje de *Nothofagus tipo dombeyi*. Los triángulos señalan las dataciones radiocarbónicas para cada sitio.

Eucryphia/Caldcluvia

Las tendencias de cambio a escalas de tiempo multimilenial en los registros de lagos Lepué, Melli y Tahui son bastante similares (Figura 12), sin embargo, a escala milenial se observan importantes diferencias que están dadas por los distintos tiempos deposicionales que presentan los registros obtenidos a partir de estos 4 lagos, que en promedio corresponden a Lago Lepué: 17,3 años/cm; Lago Condorito: 17,9 años/cm; Lago Melli: 71,7 años/cm y Lago Tahui: 33,3 años/cm. Esto muestra de manera clara las diferencias que existen en el control estratigráfico y cronológicos en sitios que presentan un ambiente deposicional con tasa de acumulación constantes (Lago Lepué y Condorito) versus sitios que presentan ambientes deposicionales variables presentando cambios en las de acumulación (Lagos Melli y Tahui). *Eucryphia/Caldcluvia* aparece en los registros de Lago Lepué y Lago Condorito con un pequeño pico a los 11,4 ka, posteriormente, el registro de Lago Condorito presenta incrementos discretos a los 11 y 10,5 ka, aumentando abrupta y sostenidamente su porcentaje a partir de 10,2 ka hasta llegar a un máximo de 49,5% en 9,7 ka (truncado en la figura 12). En Lago Lepué se registran incrementos discretos de corta duración a partir de 9,8; 9,4; 9,1 y 8,5 ka, presentando un incremento abrupto y sostenido de gran magnitud a partir de 8,2 ka que alcanzó un máximo de ~25% a los 7,6 ka. Este último incremento ocurre 2000 años después del abrupto aumento de este taxon en Lago Condorito. En lagos Melli y Tahui ocurre un incremento abrupto a partir de

9,5 ka, llegando a un máximo de 25 % a los 7,7 ka, desde donde comienza un sostenido descenso hacia el presente. Observo diferentes tiempos en el incremento a elevados porcentajes de este taxon entre Lago Lepué y los registros lacustres de Isla Grande de Chiloé y Región de los Lagos, que se explica por la disminución en los niveles lacustres a raíz del descenso en las precipitaciones y aumento en la temperatura descrito entre ~7,6-11 ka (Moreno 2004, Abarzúa y col., 2004, Abarzúa & Moreno 2008). En este intervalo de tiempo, la menor superficie de los lagos más pequeños provocó que se sobreestimara y se amplificara la señal de *Eucryphia/ Caldcluvia*. En los lagos Melli, Tahui y Condorito, la representatividad areal de estos lagos llegó a un nivel en extremo local (Jacobson & Bradshawn, 1981), mientras que en Lago Lepué, debido a su tamaño y profundidad, la reducción de su área sensora no se vio afectada tan severamente. Posteriormente en Lago Lepué *Eucryphia/ Caldcluvia* disminuyó sostenidamente entre 4,3-6,5 ka. A los 4,3 ka ocurre un incremento de 90 años de duración y luego de esto, el taxon mantiene un sostenido descenso hacia el presente. En Lago Condorito, en cambio, *Eucryphia/ Caldcluvia* vuelve a incrementar de manera sostenida entre 2-5 ka, ocurriendo un abrupto y breve pico de este taxon a los 3,8 ka, similar a lo ocurrido en Lago Lepué a los 4,3 ka, y alcanzado un máximo de 20% a los 2 ka. Posteriormente disminuye hacia el presente (Figura 12). En este punto se observan importantes diferencias entre los registros de Lago Condorito y Lago Lepué ya que el incremento en Lago Condorito entre 2-5 ka evidencia la persistencia del bosque Valdiviano en este intervalo de tiempo,

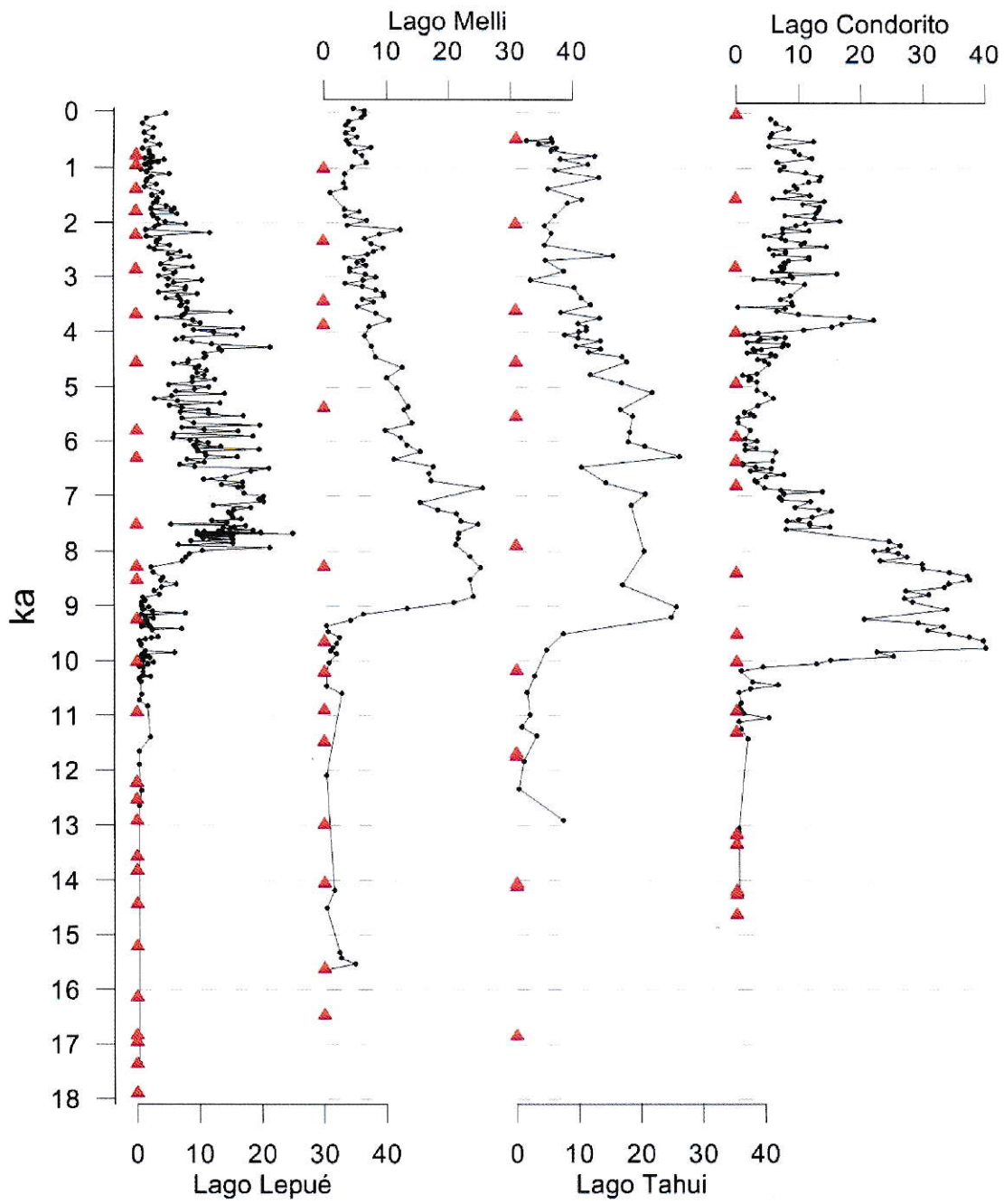


Figura 12. Comparación entre sitios, porcentaje de *Eucryphia/Caldcluvia*. Los triángulos señalan las dataciones radiocarbónicas para cada sitio.

mientras que en Lago Lepué se observa la declinación de este tipo de bosque en el registro. Esto está señalando que se instaure mayor heterogeneidad en las señales de cambio vegetacional, posiblemente climática, con condiciones locales de mayor temperatura y de menor precipitación en Lago Condorito, mientras que Lago Lepué muestra cambios hacia condiciones húmedas y frías hacia el presente.

Podocarpus nubigena

Podocarpus nubigena aparece en Lago Lepué a partir de 17,1 ka con discretos picos menores al 2%, en Lago Melli aparece a los 16,6 ka con valores menores al 2 %, en Lago Tahui aparece a los 16,8 ka con porcentajes cercanos a cero y en Lago Condorito se registra a partir de 14,3 ka. Posteriormente *Podocarpus nubigena* describe un incremento con cronologías muy similares en los 4 lagos: en Lago Lepué este taxon comienza un incremento sostenido a partir de 14,5 ka llegando a máximos valores de porcentaje a los 12,8 ka, mientras que Lago Melli incrementa a partir de 14,3 ka, en Lago Tahui esboza un incremento a partir de 14 ka y en Lago Condorito comienza a incrementar a los 14,3 ka (Figura 13). *Podocarpus nubigena* en Lago Lepué llega a mínima abundancia con un promedio de 0,7% entre 7,8-10,5 ka, mientras que en Lago Melli disminuye abruptamente a los 10,9 ka, llegando a valores cercanos a cero a los 9,7 ka. Lago Tahui esboza un máximo en torno a 12,8 ka y desaparece del registro a partir de 11,2 ka, mientras que en Lago Condorito

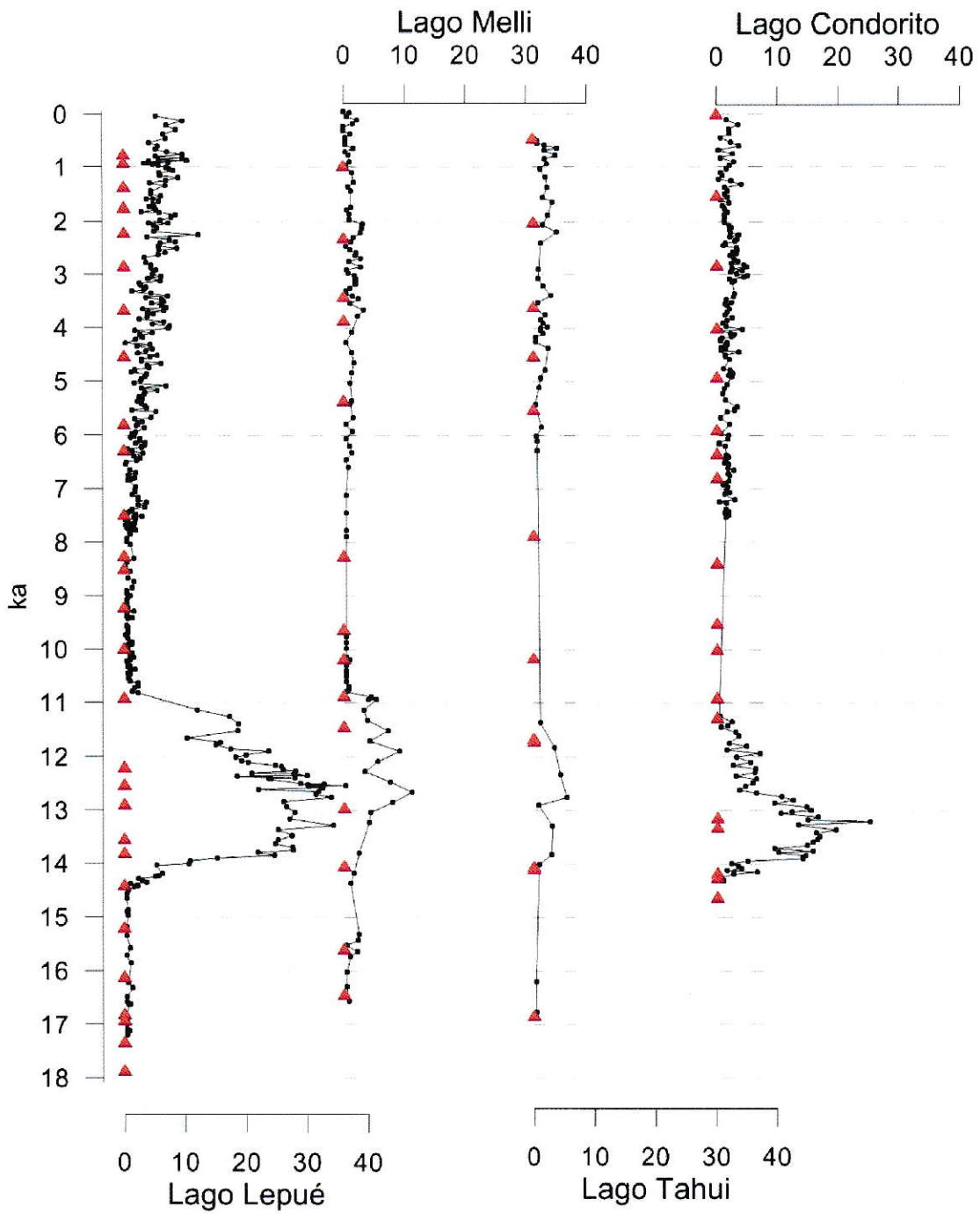


Figura 13. Comparación entre sitios, porcentaje de *Podocarpus nubigena*. Los triángulos señalan las dataciones radiocarbónicas para cada sitio.

el porcentaje *Podocarpus nubigena* comienza a disminuir a partir de ~13 ka, desapareciendo del registro a los 11 ka. A partir de 7,8 ka, en Lago Lepué *Podocarpus nubigena* comienza un sostenido incremento hacia el presente, llegando al 9,7%, mientras que Lago Condorito aparece nuevamente en el registro a los 7,8 ka, incrementando, aunque de manera más atenuada que lo observado en Lago Lepué, alcanzando valores cercanos a 3,6% en el presente, mientras que lagos Melli y Tahui sólo presentan un incremento marginal, dando cuenta de la pérdida de sensibilidad a la señal polínica, ya que posiblemente los registros están dando cuenta de la dinámica local de estos lagos.

Saxegothaea conspicua

Saxegothaea conspicua aparece desde la base del registro en Lago Lepué (17,5 ka), con pequeños picos de abundancia entre 2-4%. En los registros de Lago Melli y Tahui, *Saxegothaea conspicua* muestra pequeños picos de abundancia menores al 5% entre 11-17 ka en Lago Melli, mientras que en Lago Tahui ocurren entre 12-14,8 ka. El registro de Lago Condorito muestra picos discretos de *Saxegothaea conspicua* a partir de 11,3 ka y comienza a incrementar sostenidamente hacia el presente a partir de ~7,8 ka.

En Lago Lepué, *Saxegothaea conspicua* comienza un sostenido incremento a partir de los 6 ka; mientras que en Lago Melli, a partir de 7,9 ka, presenta

diversos picos de abundancia hacia el presente sin ninguna tendencia clara, destacándose un pico que alcanza el valor máximo de 8% en torno a ~5 ka. En Lago Tahui se observan diversos picos de abundancia sin ninguna tendencia en particular a partir de 6,2 ka hacia el presente. La tendencia de incremento de *Saxegothaea conspicua* en Lago Lepué se mantiene hasta ~2 ka evidenciando que las condiciones húmedas y frías persisten en este periodo, mientras que en Lago Condorito ocurre una disminución abrupta y breve de este taxon entre 4-3,5 ka, indicando un cambio hacia condiciones de menor precipitación. A los 3,6 ka en Lago Condorito, *Saxegothaea conspicua* alcanza un máximo de 20%, el mayor porcentaje en todo el registro que da cuenta de un momento húmedo y frío; posteriormente entre 1,8-3,6 ka disminuye de manera abrupta hasta llegar a 4,5%, evidenciando condiciones de menor humedad y temperaturas más templadas, entre 1-1,8 ka *Saxegothaea conspicua* incrementa levemente llegando a ~8% y entre 0-1 ka disminuye a 4%, indicando una tendencia en el clima hacia condiciones de menor humedad y mayor temperatura. En Lago Lepué, *Saxegothaea conspicua* registra una reversión en su tendencia a incremento entre 1-2 ka, alcanzándose valores de 3,2% a los 1,5 ka. Posterior a esto, el porcentaje de *Saxegothaea conspicua* incrementa hacia el presente (Figura 14), indicando la persistencia de condiciones frías y húmedas.

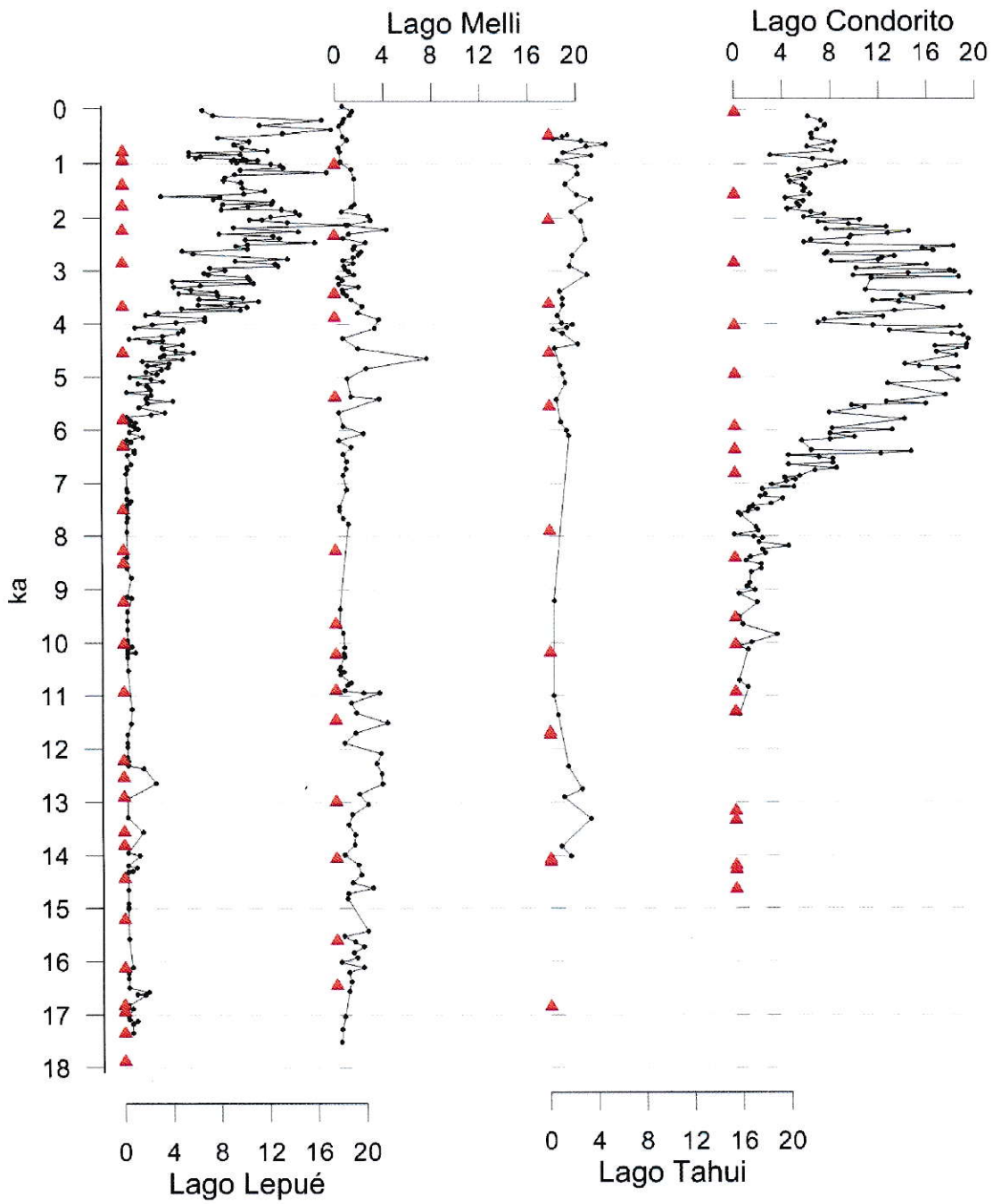


Figura 14. Comparación entre sitios, porcentaje de *Saxegothea conspicua*. Los triángulos señalan las dataciones radiocarbónicas para cada sitio.

Weinmannia trichosperma

Weinmannia trichosperma aparece en el registro de Lago Lepué a partir de 16,6 ka, en Lago Melli aparece a los 17,5 ka, en Lago Tahui aparece a los 15,7 ka y en Lago Condorito aparece a los 14,3 ka (Figura 15). En Lago Lepué, *Weinmannia trichosperma* comienza su incremento a los ~11,9 ka, entre 9,5-10,9 ka llega a valores cercanos a 20 %, con dos picos de abundancia que llegan a ~30% a los 10,2 y 9,2 ka. En Lago Melli, este taxon presenta dos picos de abundancia a los ~12,1 y 15,5 ka, cercanos al 10%, luego comienza un incremento sostenido a partir de 11,5 ka, llegando a un máximo de abundancia a los 10 ka (~60%); mientras que en lago Tahui, el incremento ocurre a los ~11,9 ka con el máximo de porcentaje a los ~10,5 ka (llega a ~65% de abundancia). Lago Condorito comienza un sostenido incremento a los ~13,2 ka, llegando hasta un máximo de 60% a los 12 ka.

En Lago Lepué, *Weinmannia trichosperma* alcanza un plateau entre 7,5-9,2 ka, desde donde comienza a disminuir a valores mínimos de porcentaje. Entre 8-10 ka en Lago Melli, y entre 8-10,6 ka en Lago Tahui se produce una disminución hasta valores mínimos de este taxon. En el registro de Lago Condorito, *Weinmannia trichosperma* disminuye a 10% a los 11 ka, ocurriendo dos picos de ~30% de abundancia a los 10 y 10,5 ka; descendiendo a valores mínimos de porcentaje a ~8,9 ka. En Lago Lepué,

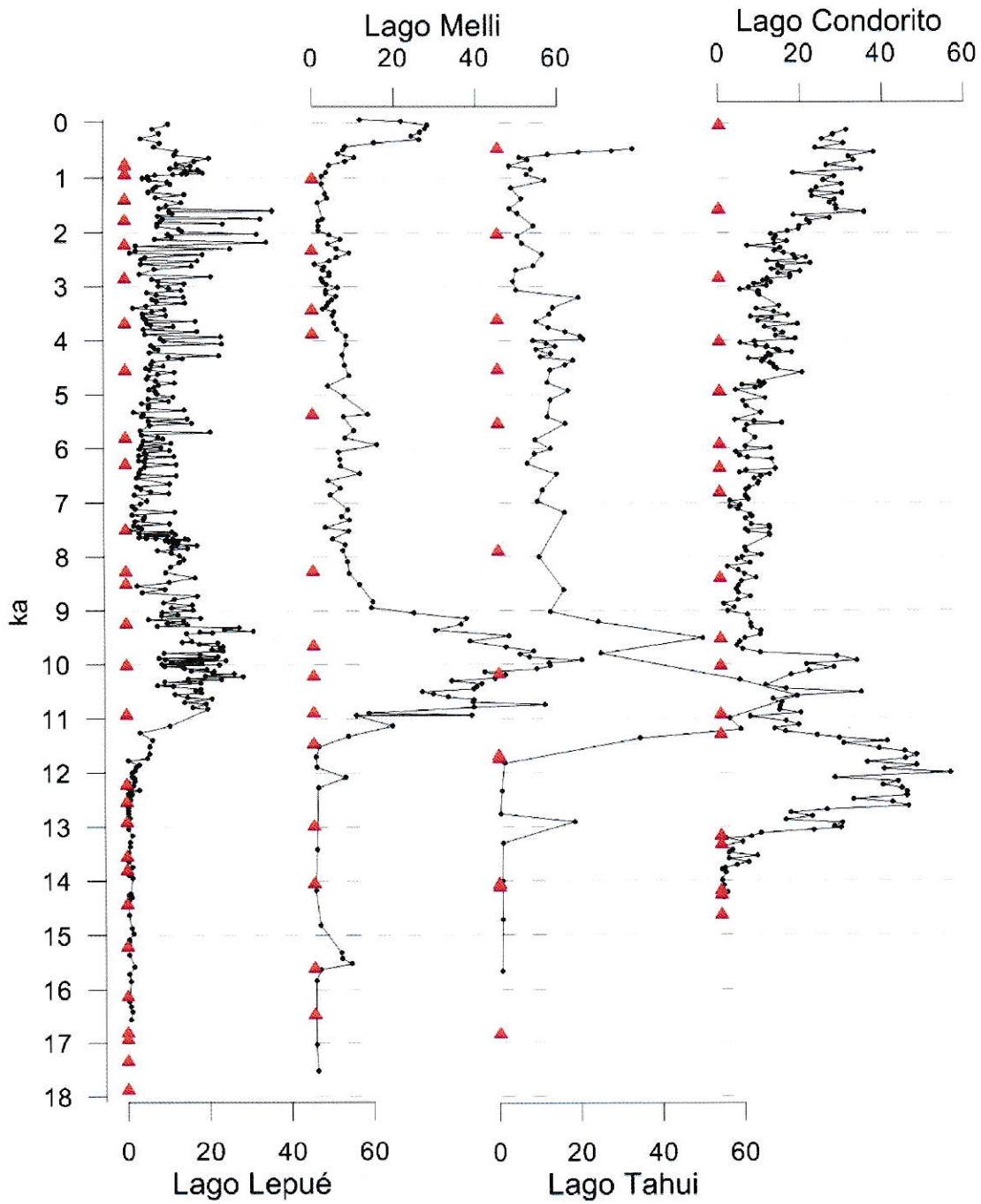


Figura 15. Comparación entre sitios, porcentaje de *Weinmannia trichosperma*. Los triángulos señalan las dataciones radiocarbónicas para cada sitio.

Weinmannia trichosperma comienza a incrementar gradualmente entre 1,6-7,5 ka. Posteriormente, entre 1-1,6 ka disminuye abruptamente a valores mínimos de porcentaje, incrementando entre 0,6-1 ka. A partir de 0,6 ka la tendencia de *Weinmannia trichosperma* es de disminución con un leve repunte hacia el presente. El registro de Lago Melli no muestra una tendencia clara, aunque entre 1-4 ka disminuye lentamente hasta valores mínimos, desde donde incrementa rápidamente hacia el presente. Lago Tahui esboza un leve incremento, no obstante, disminuye abruptamente a porcentajes cercanos a cero a los 3 ka y continúa en esta tendencia hasta 0,8 ka, a partir de este punto incrementa abruptamente hacia el presente. Lago Condorito comienza una tendencia incremento gradual a partir de 9 ka, que se vuelve más abrupta a partir de 3 ka hasta llegar al presente.

6. Conclusiones

1. El registro sedimentario proveniente del sector más profundo de Lago Lepué , abarca los últimos 17.800 años de manera continua sin variaciones en el ambiente deposicional.
2. El registro palinológico muestra entre 16,9-17,5 ka un cambio desde vegetación dominada por taxa herbáceos a una vegetación conformada por el taxon *Nothofagus* tipo *dombeyi*, *Isoetes* alcanza su valor máximo de porcentaje, indicando condiciones de menor precipitación y un leve incremento en la temperatura posterior al fin del UMG. Entre 10,9-16,9 ka se evidencia el dominio de taxa de bosque Norpatagónico, con condiciones climáticas húmedas y frías, asociadas con la intensificación o migración de los vientos del oeste a esta zona. Los sucesivos máximos de porcentaje de *Fitzroya/Pilgerodendron* a los 16 ka; de Myrtaceae a los 14,5 ka; de *Podocarpus nubigena* a los 12,5 ka y nuevamente de Myrtaceae a los 11,6 ka, dan cuenta de importantes pulsos de calentamiento y enfriamiento. Entre 7,8-10,9 ka se registran los menores porcentajes de taxa de bosque Norpatagónico, mientras que se observan elevados valores de *Hydrangea*, *Weinmannia trichosperma*, Myrtaceae y la planta acuática *Isoetes*, además del incremento de *Eucryphia/Caldcluvia* a partir de 9,8 ka, taxon indicador de bosque

Valdiviano. Estos taxa implican mayores niveles de perturbación, condiciones climáticas más templadas, menor precipitación y disminución del nivel lacustre respecto al periodo anterior, lo que me permite inferir a una migración hacia el sur o debilitamiento de los vientos del oeste en la zona de estudio. Entre 5,5-7,8 ka se obtienen los máximos valores de *Eucryphia/Caldcluvia* y mientras comienzan a incrementar gradualmente, los taxa indicadores de bosque Norpatagónico *Podocarpus nubigena* y *Nothofagus tipo dombeyi*, señalando el comienzo del incremento de las precipitaciones y la disminución de la temperatura, asociado esto a la intensificación o migración de los vientos del oeste en esta zona. Entre 2,5-5,5 ka se registra el incremento de *Saxegothaea conspicua*, taxon asociado a condiciones frías, y la declinación de los taxa *Eucryphia/Caldcluvia e Hydrangea*, salvo en un instante entre 3,8-4,4 ka, en donde ocurre una breve reversión hacia condiciones más cálidas y menos húmedas inferidas por el incremento de *Eucryphia/Caldcluvia*. A partir de 2,5 ka hacia el presente, el registro presenta una alta heterogeneidad vegetacional, lo que indica condiciones climáticas mucho más cambiantes que lo que se ha registrado previamente.

3. El parámetro tasas de cambio muestra 19 momentos en los cuales se observa un elevado valor de este parámetro, la mayoría ocurriendo con un espaciamento temporal entre ellos a escalas de tiempo submilenial: 17; 16,5; 16; 14,3; 13,8; 12,5; 11,3; 10,9; 9,2; 8,8; 7,8; 6,5; 5,7; 5,5; 4,4; 3,9; 3,4; 2,5 y 1 ka.

4. El registro de polen de Lago Lepué muestra variaciones de los taxa hidrófilos en escalas de tiempo multimileniales y mileniales, similar a lo que da cuenta el registro de Lago Condorito. Sin embargo, la estructura de cambio en Lago Lepué es más gradual frente a los cambios evidenciados en Lago Condorito, en donde ocurren cambios desde altos porcentajes a bajos porcentajes de taxa higrófilos ocurren más rápidamente, en rangos de tiempo centenal. Esto se observa en la variación del taxon higrófilo *Nothofagus* tipo *dombeyi*, que presenta similar variación a escala multimilenial en Lago Lepué y Condorito, pero a escalas de tiempo milenial/submilenial se observan diferencias: En Lago Lepué la disminución desde altos porcentajes ocurre entre 10,8-16,2 ka, mientras que en Lago Condorito ocurre entre 12-13 ka, los valores mínimos en Lago Lepué ocurren entre 9-11 ka, mientras que en Lago Condorito ocurren entre 7,8-12 ka y a partir de 2 ka, se observa una gran diferencia en las tendencias de cambio en ambos sitios, ya que en Lago Lepué *Nothofagus* tipo *dombeyi* comienza una tendencia al incremento y en Lago Condorito disminuye el porcentaje. Lago Lepué presenta una señal polínica extralocal mucho mayor que la presente en Lago Condorito, debido a que Lepué presenta un área mucho mayor que Condorito, integrando una señal polínica mucho más amplia.

5. El registro de Lago Lepué presenta alta abundancia de carbón a escalas de tiempo multimilenial - milenial entre 8,5-11 ka y 0,8-2,4 ka, momentos en los cuales se infiere menor humedad según el registro vegetacional de Lago

Lepué, mientras que entre 11-17,5 ka y 2,4-8,5 ka no se registra acumulación de carbón, salvo picos aislados de alta acumulación de carbón entre 16-17,5 ka y a 12,6; 7,5 y 4,2 ka, asociados a condiciones húmedas según el registro vegetacional. Por lo tanto, la ocurrencia de fuego en el registro de Lago Lepué está subyugado al control climático asociado a las variaciones en el aporte de humedad de los vientos del oeste (Abarzúa y col., 2004, Moreno 2004, Whitlock 2007, Power y col., 2008, Abarzúa & Moreno 2008).

6. El registro obtenido de Lago Lepué da cuenta de cambios importantes en la vegetación asociados a variaciones en fase entre el taxon *Weinmannia trichosperma* y los cambios en la acumulación de carbón. Este taxon se ha reconocido como indicador de perturbaciones asociado a fuego (Abarzúa & Moreno 2004), y en este registro estudiado, se aprecia una clara asociación entre máxima abundancia de carbón y *Weinmannia trichosperma* a escalas de tiempo milenial/submilenial (Figura 10).

7. La vegetación responde a un patrón de cambio asociado a variaciones climáticas que provocaron cambios en los niveles lacustres en la historia de Lago Lepué y a un patrón de perturbación asociado a la actividad de fuego. Las variaciones hidrológicas se evidencian en la variación del taxon hidrófilo *Nothofagus* tipo *dombeyi*, el taxon acuático *Isoetes*, mientras que la perturbación por la ocurrencia de fuegos se manifiesta en la repuesta de

incremento de *Weinmannia trichosperma* frente a la ocurrencia de paleofuegos.

8. La mayoría de los taxa comparados en este estudio presentan variaciones con tendencias de cambio a escalas de tiempo multimilenial muy similares a la luz de un análisis utilizando una cronología común para todos los sitios. Sin embargo, las diferencias presentes en estas tendencias de cambio a escalas de tiempo submilenial – centenal en magnitud y rapidez de cambio pueden ser atribuidas a variaciones locales y particulares para cada sitio, así como también son atribuidas a diferencias en el área y profundidad de los lagos estudiados.

7. Bibliografía

Abarzúa, A., Villagrán, C., Moreno, P.I., 2004. Deglacial and postglacial climate history in eastcentral Isla Grande de Chiloé, southern Chile (43°S). *Quaternary Research* 62: 49-59

Abarzúa, A., Moreno, P.I., 2008. Changing fire regimes in the temperate rainforest region of southern Chile over the last 16,000 yr. *Quaternary Research* 69: 62-71.

Anderson R.F., Ali S., Bradtmiller L.I., Nielsen S.H.H., Fleisher M.Q., Anderson B.E., Burckle L.H., 2009. Wind-Driven Upwelling in the Southern Ocean and the Deglacial Rise in Atmospheric CO₂. *Science* 323: 1443-1448.

Denton, G.H., Lowell, T.V., Moreno, P.I., Andersen, B.G., Schlüchter C. 1999. Geomorphology, stratigraphy, and radiocarbon chronology of Llanquihue Drift in the area of the Southern Lake District, Seno Reloncaví, and Isla Grande de Chiloé, Chile. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography* 81 A: 167-229.

Faegri y Iversen, J. 1989. *Textbook of pollen analysis*. John Wiley & Sons Ltd. London. United Kingdom. 327pp.

Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci R., Marengo J. 2007. Present-day South American Climate. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 281: 180-195.

Haberle, S.G., Bennett, K.D., 2004. Postglacial formation and dynamics of North Patagonian Rainforest in the Chonos Archipelago, Southern Chile. *Quaternary Science Reviews* 23, 2433–2452.

Haug, G. H., Günther, D., Peterson, L. C., Sigman, D. M., Hughen, K. A. & Aeschlimann, B. (2003). Climate and the Collapse of Maya Civilization. *Science* 299: 1731-1735.

Heusser C, J. 1971. *Pollen and Spores of Chile*. The University of Arizona Press.

Heusser, C., 1987. Fire history of Fuego-Patagonia. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 5: 93–109.

Heusser, C.J., 1990. Ice age vegetation and climate of subtropical Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 80: 107–127.

Heusser, C., 1994. Paleoindians and fire during the late Quaternary in southern South America. *Revista Chilena de Historia Natural* 67: 435–442.

Heusser, L. E., Heusser, C. J., Kleczkowski, A. & Crowhurst, S. (1999). A 50,000-yr pollen record from Chile of South American millennial-scale climate instability during the last glaciation. *Quaternary Research* 52: 154-158.

Heusser, C. J. (2003). *Ice Age in the Southern Andes: A Chronicle of Paleocological Events*. Amsterdam: Elsevier B.V.

Huber, U. M., Markgraf, V. & Schäbitz, F. (2004). Geographical and temporal trends in Late Quaternary fire histories of Fuego-Patagonia, South America. *Quaternary Science Reviews* 23: 1079-1097.

Jacobson, G. L. & Bradshaw, R. H. W. (1981). The selection of sites for paleovegetational studies. *Quaternary Research* 16: 80-96.

Kaplan, M. R., Moreno, P. I. & Rojas, M. (2008). Glacial dynamics in southernmost South America during Marine Isotope Stage 5e to the Younger Dryas chron: a brief review with a focus on cosmogenic nuclide measurements. *Journal of Quaternary Science* 23: 649-658.

Massaferro, J.I., Moreno, P.I., Denton, G.H., Vandergoes, M., Dieffenbacher-Krall, A. 2009. Chironomid and pollen evidence for climate fluctuations

during the Last Glacial Termination in NW Patagonia. *Quaternary Science Reviews* 28: 517–525.

Miller, A. (1976). The Climate of Chile. In: Schwerdtfeger, W. (ed.) *Climates of Central and South America*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company: 113-145.

Moreno P.I., Lowell, T.V., Jacobson JR, G.L., Denton, G.H. 1999. Abrupt vegetation and climate changes during the last glacial maximum and the last termination in the Chilean Lake District: a case study from Canal de la Puntilla (41°S). *Geografiska Annaler* 81A:285-311.

Moreno P.I., Jacobson JR, G.L., Lowell, T.V., Denton, G.H. 2001. Interhemispheric climate links revealed by a late-glacial cooling episode in southern Chile. *Nature*, 409: 804-808.

Moreno, P. & Leon, A. 2003. Abrupt vegetation changes during the last Glacial–Holocene transition in mid-latitude South America. *Journal of Quaternary Science* 18: 787–800.

Moreno, P. I. 2004. Millennial-scale climate variability in northwest Patagonia over the last 15000 yr. *Journal of Quaternary Science* 19: 35-47.

Moreno, P. I., Francois, J. P., Villa-Martínez, R. P. & Moy, C. M. (2009). Millennial-scale variability in Southern Hemisphere westerly wind activity over the last 5000 years in SW Patagonia. *Quaternary Science Reviews* 28: 25-38.

Moy, C. M., Seltzer, G. O., Rodbell, D. T. & Anderson, D. M. (2002). Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature* 420: 162-165.

Moy, C. M., Dunbar, R. B., Moreno, P. I., Francois, J. P., Villa-Martínez, R., Mucciarone, D. M., Guilderson, T. P. & Garreaud, R. D. (2008). Isotopic evidence for hydrologic change related to the westerlies in SW Patagonia, Chile, during the last millennium. *Quaternary Science Reviews* 27: 1335-1349.

Power, M. J., Marlon, J., Ortiz, N., Bartlein, P. J., Harrison, S. P., Mayle, F. E., Ballouche, A., Bradshaw, R. H. W., Carcaillet, C., Cordova, C., Mooney, S., Moreno, P. I., Prentice, I. C., Thonicke, K., Tinner, W., Whitlock, C., Zhang, Y., Zhao, Y., Ali, A. A., Anderson, R. S., Beer, R., Behling, H., Briles, C., Brown, K. J., Brunelle, A., Bush, M., Camill, P., Chu, G. Q., Clark, J., Colombaroli, D., Connor, S., Daniau, A. L., Daniels, M., Dodson, J., Doughty, E., Edwards, M. E., Finsinger, W., Foster, D., Frechette, J., Gaillard, M. J., Gavin, D. G., Gobet, E., Haberle, S., Hallett, D. J., Higuera, P., Hope,

G., Horn, S., Inoue, J., Kaltenrieder, P., Kennedy, L., Kong, Z. C., Larsen, C., Long, C. J., Lynch, J., Lynch, E. A., McGlone, M., Meeks, S., Mensing, S., Meyer, G., Minckley, T., Mohr, J., Nelson, D. M., New, J., Newnham, R., Noti, R., Oswald, W., Pierce, J., Richard, P. J. H., Rowe, C., Goni, M. F. S., Shuman, B. N., Takahara, H., Toney, J., Turney, C., Urrego-Sanchez, D. H., Umbanhowar, C., Vandergoes, M., Vanniére, B., Vescovi, E., Walsh, M., Wang, X., Williams, N., Wilmshurst, J. & Zhang, J. H. (2008). Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. *Climate Dynamics* 30: 887-907.

Schmithüsen, J. 1956. Die raumliche Ordnung der chilenischen Vegetation. *Bonner Geographische Abhandlungen* 17: 1-86.

Steffensen, J. P., Andersen, K. K., Bigler, M., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Fischer, H., Goto-Azuma, K., Hansson, M., Johnsen, S. J., Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Popp, T., Rasmussen, S. O., Röthlisberger, R., Ruth, U., Stauffer, B., Siggaard-Andersen, M.-L., Sveinbjörnsdóttir, Á. E., Svensson, A. & White, J. W. C. (2008). High-Resolution Greenland Ice Core Data Show Abrupt Climate Change Happens in Few Years. *Science* 321: 680-684.

Stuiver, M., Reimer, P.J. Reimer, R.W. 2005. CALIB 5.0. WWW program and Documentation.

Toggweiler J.R., 2009. Shifting Westerlies. *Science* 323: 1434-1435.

Veblen, T.T., Markgraf, V., 1988. Steppe Expansion in Patagonia? *Quaternary Research* 30: 331-338

Villagrán, C. 1980. Vegetationsgeschichtliche und pflanzensoziologische Untersuchungen im Vicente Perez Rosales Nationalpark (Chile). *Dissertationes Botanicae* 54: 1-165.

Villagrán, C. 1985. Análisis palinológico de los cambios vegetacionales durante el Tardiglacial y Postglacial en Chiloé. *Revista Chilena de Historia Natural*, 58: 57–69.

Villagrán, C. 1988 a Late Quaternary vegetation of Southern Isla Grande de Chiloé, Chile. *Quaternary Research*, 29: 294–306.

Villagrán, C. 1988 b. Expansion of Magellanic moorland during the Late Pleistocene: palynological evidence from northern Isla Grande de Chiloé, Chile. *Quaternary Research*, 30: 304–314.

Whitlock, C., Bianchi, M.M., Bartlein, P.J., Markgraf, V., Marlon, J., Walsh, M., McCoy, N., 2006. Postglacial vegetation, climate, and fire history along the east side of the Andes (lat 41-42.5°S), Argentina. *Quaternary Research* 66: 187-201

Whitlock, C., Moreno, P.I., Bartlein, P. 2007. Climatic controls of Holocene fire patterns in southern South America, *Quaternary Research* 68: 28-36.