

Estudios paleoambientales en lagos volcánicos en la Región Volcánica de Pali Aike, sur de Patagonia (Argentina): palinología

Frank SCHÄBITZ¹, Marta M. PAEZ², María V. MANCINI², Flavia A. QUINTANA², Michael WILLE¹, Hugo CORBELL³, Torsten HABERZETTL¹, Andreas LÜCKE⁴, Aldo R. PRIETO², Nora MAIDANA⁵, Christoph MAYR⁴, Christian OHLENDORF¹, Gerhard H. SCHLESER⁴ & Bernd ZOLITSCHKA¹

¹Geomorphology and Polar Research (GEOPOLAR), Institute of Geography, University of Bremen. Celsiusstr. FVG-M, 28359 Bremen, Germany.

²Laboratorio de Paleocología y Palinología, Universidad de Mar del Plata. Funes 3250, 7600 Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

³Museo Argentino de Ciencias Naturales "B. Rivadavia". Av. A. Gallardo 470, Buenos Aires, Argentina.

⁴Isotope Geochemistry and Palaeoclimate-ICG V: Sedimentary Systems, Research Center Jülich. 52425 Jülich, Germany.

⁵Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Buenos Aires. Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires, Argentina.

Abstract: Palaeoenvironmental studies of crater lakes in the Pali Aike Volcanic Field, southern Patagonia (Argentina): palynology. Sedimentary records from crater lakes are of major scientific interest because they provide continuous high-resolution paleoclimatic and paleoenvironmental archives. For the first time a limnogeological and palynological survey of crater lakes was performed in the Pali Aike Volcanic Field (52°S, southeastern Santa Cruz, Argentina). Studied lakes of the Patagonian steppe are mostly shallow and consist of old and already sediment-filled volcanic structures or of deflation pans. However, bathymetric measurements revealed two deep crater lakes: Laguna Azul (50 m) and Laguna Potrok Aike (100 m) which may serve as archives for paleoecological studies. Although modern pollen spectra are related with vegetational and the precipitation gradients from the Andes to Atlantic coast, the modern pollen spectra of both lakes revealed the change of plants communities in each geomorphological unit. The first approach between modern pollen data and fossil material from the fine-grained sediments of both lakes we are able to interpret environmental and climatic variations during the last 2,000 years as well as human influence for the last two centuries.

Key words: crater lakes, palaeoenvironments, palynology, limnogeology, Patagonia, Argentina.

El Hemisferio Sur juega un rol clave en el sistema climático global debido a la extensión de los océanos y de la cubierta de hielo antártico. La presencia de la masa de hielo Antártico afecta la dinámica del nivel del mar, la temperatura superficial del mar y el gradiente de presión meridional entre los 38° y 50°S. La única masa continental entre este rango latitudinal y el círculo Antártico es el sur de Sudamérica, constituyendo un escenario clave para la reconstrucción de las condiciones paleoclimáticas de un área sujeta a la deriva de los centros de presión y de los vientos de latitudes medias y altas. Como resultado de la acción de estos factores climáticos, la fuerte deriva de los vientos del oeste advecta masas de aire antártico al continente acentuando la velocidad del viento. Este es uno de los factores más importantes de control climático en el sur de Patagonia (Weischet, 1996).

Una de las cuestiones científicas aún sin resolver está relacionada con el comportamiento sincrónico o asincrónico del cambio climático durante el final de la última glaciación (Terminación I) en ambos hemisferios (Broecker, 1998). En el Hemisferio Sur el problema del control cronológico está evidenciado en los testigos de hielo antártico, sedimentos marinos, fluctuaciones glaciares y registros de polen y escarabajos (Denton *et al.*, 1999; Mc Culloch *et al.*, 2000) que conducen a diferentes hipótesis sobre las señales paleoclimáticas. El proyecto SALSA (*South Argentinean Lake Sediment Archives and Modelling*) tiene el propósito de contribuir a esta problemática mediante estudios interdisciplinarios de datos cuantitativos múltiples *proxies* en registros lacustres de alta resolución en el Campo Volcánico de Pali Aike (PAVF) (Fig. 1). Las características ambientales del área de estudio y las metodologías seleccionadas proveerán infor-

mación sobre los patrones regionales y temporales de las condiciones climáticas pasadas. La generación de tales datos tenderá a la comprensión de los mecanismos del sistema climático mediante la construcción de modelos predictivos para el futuro (Valdes, 2000). Estas investigaciones tendrán aplicación en las actividades económicas de las poblaciones locales basadas en el pastoreo intensivo de ganado ovino (Aagesen, 2000).

En el sur de Patagonia los registros climáticos terrestres están restringidos a estudios polínicos de turberas, mallines y sedimentos de cuevas que abarcan los últimos 14.000 años (Moore, 1983; Schäbitz, 1991; Heusser, 1995; Markgraf, 1993; Mancini, 1998, 2002; Prieto *et al.*, 1998). El único registro sedimentario del PAFV analizado proviene del Maar Magallanes (Fig. 1.A) (Corbella *et al.*, 2000). Este registro, de 59 m de profundidad, comprende los últimos >31.600 ^{14}C años AP. En los análisis de diatomeas y polen se registraron diferentes fluctuaciones en la profundidad del agua y de la salinidad, las cuales se interpretaron en términos de la temperatura de verano (Maidana & Corbella, 1997, Corbella *et al.*, 2000).

En este trabajo se presentan los primeros resultados del análisis polínico regional entre los 51-52°S y los locales provenientes de las lagunas Azul y Potrok Aike, las prospecciones batimétricas, limnológicas y sedimentológicas y los estudios polínicos fósiles provenientes de dos testigos cortos de ambas lagunas que comprenden los últimos 2.000 años.

ÁREA DE INVESTIGACIÓN

Geología y vulcanismo

En el extremo sur de Santa Cruz se desarrolla la Meseta Patagónica Austral. El sustrato de estas planicies está constituido por los depósitos mesozoicos y cenozoicos de la Cuenca de Magallanes o Austral (Biddle *et al.*, 1986). En la región sólo afloran los depósitos marinos y continentales del Cretácico Superior y los cenozoicos. Durante el levantamiento de los Andes en el Terciario se depositaron sedimentos fluviales de grano fino (tipo molasa) de edad miocena (Formación Santa Cruz) (Uliana & Biddle, 1988). Finalmente, se depositaron los rodados patagónicos de edad plio-pleistocena que forman la superficie actual de las mesetas patagónicas. Estas planicies de gravas son disectadas por amplios valles con depósitos glaciares y fluvio-glaciares. En conjunto, estas formaciones forman las Mesetas Patagónicas, las cuales descienden suavemente hacia el este en la costa atlántica. En el extremo sur de la Meseta Patagónica Austral se desarrolla el PAFV que constituye una faja tectónica-volcá-

nica de aproximadamente 50 km de ancho y más de 150 km de longitud. Está situado a 80 km al oeste de la ciudad de Río Gallegos al norte del estrecho de Magallanes y a 150 km al este de los Andes (Fig. 1.A). Se caracteriza por un vulcanismo basáltico alcalino (Skewes & Stern, 1979; Corbella, 1999b) con edades entre 3,78 Ma en el sector oeste y 0,01 Ma próximo al Océano Atlántico (Corbella, 1999a, 2002). Este vulcanismo estaría (entre 500 y 4000 m de diámetro y más de 100 m de profundidad).

Clima

La reducida masa terrestre del sur de Sudamérica no presenta condiciones climáticas cálidas durante el verano Austral como ocurre a la misma latitud en el Hemisferio Norte. Estas condiciones se relacionan con la proximidad del área de estudio al continente Antártico, que emite aire frío durante todo el año (Weischet, 1996). El PAFV está bajo la influencia de los vientos catabáticos antárticos y de las masas de aire frío del oeste. La alta radiación solar derrite los extensos campos de hielo durante el verano. Por otro lado, las corrientes oceánicas frías de Humboldt (costa oeste) y Malvinas (costa este) transportan agua fría hacia el norte y a lo largo de las costas patagónicas reduciendo el calor de la atmósfera. En síntesis, la advección de las masas de aire frío que arriban al continente causan veranos frescos, mientras que la proximidad al océano se relaciona con inviernos moderados. Estos patrones de circulación general, la influencia de las masas de aire del Pacífico y la barrera topográfica N-S de los Andes producen un marcado gradiente de precipitación (Barros *et al.*, 1979). Los vientos del oeste transportan aire húmedo desde el océano Pacífico hacia los Andes, con valores anuales mayores a 3000 mm en la costa y en el continente chileno. En las laderas orientales de los Andes, el efecto de sombra de lluvia se manifiesta en un abrupto descenso de la precipitación, con una distribución regular a lo largo del año y predominancia de climas semiáridos-húmedos y fríos. La precipitación decrece a 400 mm y a valores de 200 mm en el centro-este de la Meseta Patagónica (Burgos, 1985) donde se localiza el PAFV (Fig. 1.A). Otro factor que influye en la baja precipitación al este de los Andes es la disminución de la humedad relativa relacionada con el incremento de la temperatura.

La dirección de los fuertes y constantes vientos del O es dominante con elementos significativos del NO y SO (Weischet, 1996; Baruth *et al.*, 1998). En la costa atlántica, en Río Gallegos (Fig. 1.A) la temperatura media anual varía entre 1-2° C en julio a 12-14° C en enero y la precipitación

Cuadro 1. Formaciones vegetales del área de estudio según diferentes autores.

Hüeck y Seibert (1981)	Bosques meridionales de la zona templada	Estepas y semidesiertos patagónicos		
	Deciduos de <i>N. pumilio</i> y <i>N. antarctica</i>	Estepas gramíneas Sector Magallánico		
Seibert (1985)	Bosques Caducifolios de <i>Nothofagus pumilio</i> y <i>N. antarctica</i>	Estepa húmeda de <i>Festuca gracillima</i> y murtillares de <i>Empetrum rubrum</i>		Estepa xérica de <i>F. gracillima</i>
Cabrera (1971, 1976)	Provincia Subantártica	Provincia Patagónica		
	Distrito de los Bosques Deciduos de <i>Nothofagus antarctica</i> y <i>N. pumilio</i>	Distrito Patagónico Subandino de <i>F. pallescens</i>		
Roig (1998)	Provincia Subantártica			
	Complejo de Distritos de Bosques Mesófilos	Distrito de la Estepa Magallánica		
	Bosque Andino Caducifolio de <i>Nothofagus pumilio</i>	Húmeda de <i>Festuca gracillima</i> y murtillares de <i>Empetrum rubrum</i>		Xérica de <i>F. gracillima</i>
León et al. (1998)		Provincia Patagónica		
		Distrito Subandino	Distrito Magallánico	
		Estepa gramínea de <i>F. pallescens</i>	Estepa gramínea húmeda de <i>F. gracillima</i>	Estepa gramínea xérica de <i>F. gracillima</i>

alcanza valores anuales de 244 mm; sin embargo durante los meses de verano la temperatura alcanza 6° C e incluso valores bajo 0° C (Weischet, 1996).

Vegetación

El marcado gradiente de precipitación controla la distribución de los bosques y las estepas, principales formaciones vegetales localizadas en el gradiente O-E. Los patrones de precipitación, la alta velocidad de los vientos y la evapotranspiración afectan la ecología de las comunidades vegetales, en particular las formas de vida, la distribución y la composición florística. En el rango latitudinal 51-54°S y en dirección O-E (Fig. 1.A), las principales formaciones vegetales (Hüeck & Seibert, 1981; Heusser, 1995; Pisano, 1995; León et al., 1998; Roig, 1998;) comprenden el *Moorland* o Tundra Magallánica, que se desarrolla en los archipiélagos y bordes costeros chilenos, los Bosques Siempreverdes Templados y turberas en las áreas más húmedas del oeste de los Andes, la Tundra Andina o vegetación Altoandina desarrollada sobre el límite superior de los bosques, los Bosques Deciduos Templados de *Nothofagus* que crecen en las laderas orientales de los Andes y diferentes formaciones de la estepa patagónica que se extienden

desde el piedemonte y las mesetas hasta la costa atlántica.

Para el área de estudio, desde el límite Chile-Argentina hasta la costa atlántica entre los 51-52° S, se han propuesto varias clasificaciones fitogeográficas (Cuadro 1). En general, los Bosques Deciduos Templados están representados por *Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) Krasser y *N. antarctica* (G. Forst) Oerst. Hacia el este, la formación predominante es la estepa gramínea de *Festuca gracillima* Hook. Aproximadamente, en el sector donde se localiza la isohieta anual de 250-300 mm, en esta formación se diferencian una estepa húmeda al oeste y una más xérica en el centro-este (Roig et al., 1985; León et al., 1998) donde se localiza el PAFV (Fig. 1). En áreas más húmedas, con desagües poco profundos, que atraviesan la estepa de *Festuca gracillima*, se extienden los pastizales de *F. pallescens* (St. Yves) Parodi.

MATERIALES Y MÉTODOS

En las imágenes satelitales se observaron alrededor de cien lagunas en el PAFV. La comparación de las imágenes satelitales correspondientes a diferentes meses del año muestra que numerosas lagunas se secan al final del verano. No todas las

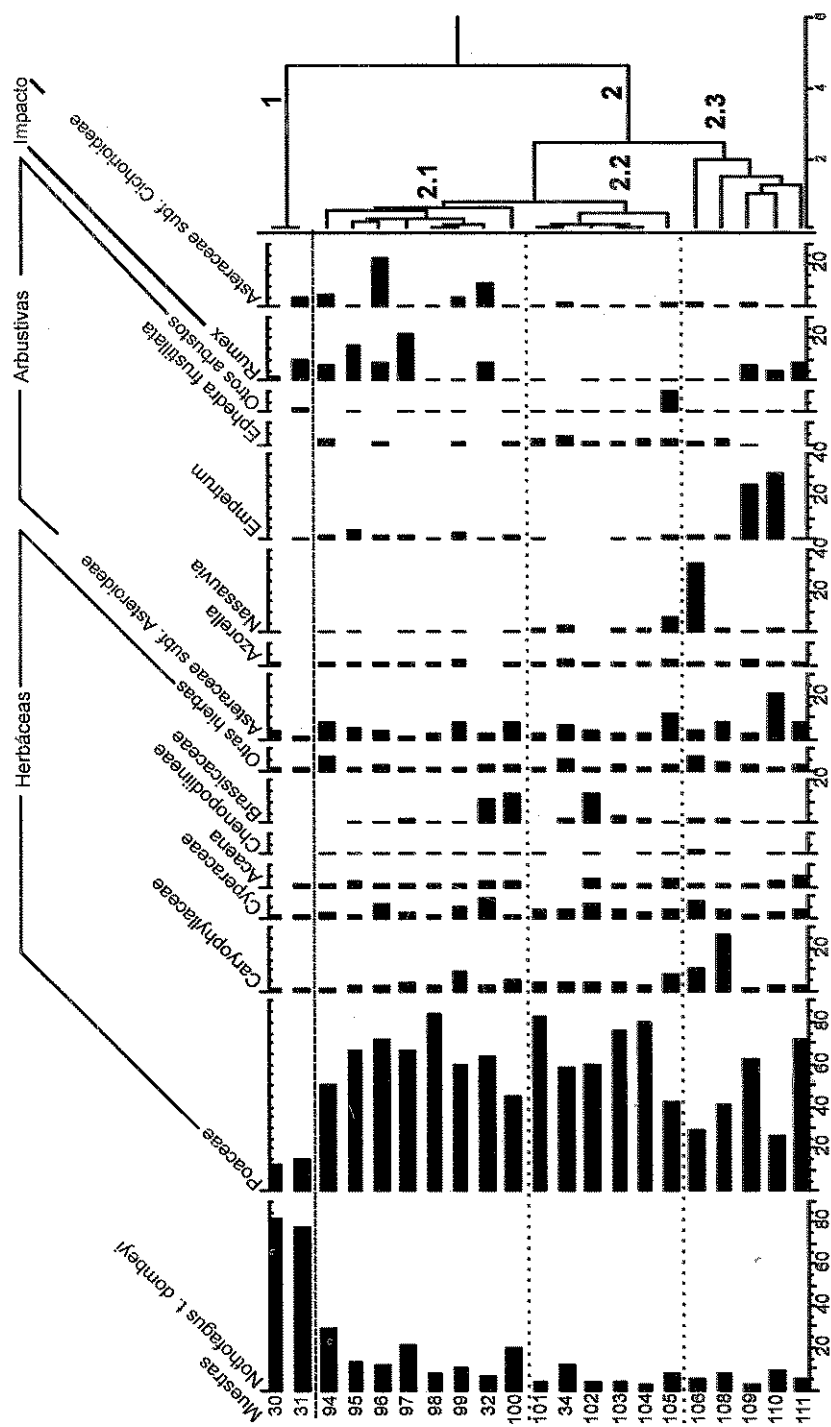


Fig. 2. Diagrama polínico porcentual y análisis de agrupamiento de las muestras actuales ordenadas de oeste a este.

lagunas son de origen volcánico; algunas de ellas probablemente se han formado por deflación. Un tercer grupo de lagunas (Laguna Esperanza y Laguna Travesía) son probablemente de origen glacial y se ubican a 180 km al noroeste de PAFV.

Durante el trabajo de campo realizado entre febrero y marzo de 2002, se prospectaron dos lagunas profundas, cinco maars secos y dos lagunas someras con agua permanente (Fig. 1.A). Las investigaciones paleoambientales se focalizaron en las dos lagunas más profundas y con agua permanente, Laguna Azul y Laguna Potrok Aike (Figs. 1.A-B), mientras que en las otras se realizaron análisis para comparaciones limnogeológicas. Con el objetivo de elaborar mapas batimétricos, como etapa básica para los estudios limnogeológicos, se realizaron mediciones sistemáticas de la profundidad de estos cuerpos de agua. Para registrar simultáneamente las profundidades del agua y las coordenadas geográficas se utilizó una ecosonda combinada con un sistema de posicionamiento geográfico (GPS). En la elaboración de mapas batimétricos se interpolaron un total de 7.428 y 3.494 mediciones de profundidad para las Lagunas Potrok Aike y Azul, respectivamente.

Los estudios geológicos, geomorfológicos y biológicos se realizaron en las cuencas y áreas próximas a ambas lagunas. El muestreo de materiales de superficie comprende la recolección de muestras de suelos, ejemplares de plantas y muestras de sedimento para la extracción del contenido polínico, y muestras de la columna de agua para los análisis sedimentológicos, geoquímicos e isotópicos. Se muestrearon 16 testigos cortos en ambas lagunas utilizando un muestreador por gravitación.

Para la elaboración del modelado polínico regional, la mayoría de los espectros polínicos actuales considerados provienen de trabajos previos (Mancini, 1998; Prieto *et al.*, 1998). Para el área de Las Buitreras se calculó una media de las muestras 7 a 13 (Prieto *et al.*, 1998). Para la numeración de las muestras polínicas se siguió el orden correlativo utilizado por Mancini (1998) (Fig. 1.B). En la interpretación de la correspondencia polen-vegetación para el gradiente Andes-costa atlántica, entre los 51°-52° S, se utilizó la información de los análisis fitosociológicos (Roig *et al.*, 1985) y fitogeográficos (Seibert, 1985; León *et al.*, 1998). De acuerdo a las características geomorfológicas diferenciales de ambas lagunas se recolectaron muestras de superficie, donde se evidenciaron cambios en la estructura de la vegetación y de la composición florística, en dirección SE-NO desde la playa hasta el nivel altitudinal de la meseta. Las secuencias polínicas provienen de los testigos cortos 02/11 de la Laguna Azul y 02/4 de la

Laguna Potrok Aike. Para la extracción del contenido polínico, las muestras actuales y fósiles se procesaron según técnicas de rutina (Faegri & Iversen, 1989). En los recuentos polínicos actuales se aplicó la técnica de área mínima criterio proveniente de los estudios de vegetación (Müller-Dombois & Ellenberg, 1974), considerando 10 esporas de *Lycopodium* como unidad de recuento. Las sumas polínicas variaron entre 200 y 600 granos por muestra. En el análisis de polen fósil las sumas polínicas alcanzaron los 500 granos, excluyendo esporas, y sólo unas pocas muestras contienen entre 200-300 granos. Con los datos obtenidos se realizaron diagramas porcentuales y análisis de agrupamiento aplicando distancia de Orloci (Programa Tilia).

En las muestras actuales se excluyeron de la suma polínica *Rumex* y Asteraceae subf. Cichorioideae, porque ambos taxones incluyen algunas especies indicadoras de impacto.

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Polen y vegetación actual a escala regional.

En los espectros polínicos (grupo 1, Fig. 2,) los Bosques Deciduos están representados por la dominancia de *Nothofagus t. dombeyi* ($\leq 80\%$), bajos valores de Poaceae ($< 20\%$) asociados con Caryophyllaceae, Cyperaceae, otras hierbas y taxones arbustivos, principalmente Asteraceae subf. Asteroideae ($< 5\%$). Estos espectros representan a los bosques de *N. pumilio* que se distribuyen principalmente en laderas andinas y colinas con buen drenaje, alternando con *N. antarctica* en los fondos de valles y en la base de las laderas andinas con buen escurrimiento. La composición polínica señala un estrato herbáceo y uno arbustivo pobre o inexistente.

En los espectros del grupo 2 (Fig. 2) domina Poaceae y corresponden a la estepa graminosa de *Festuca gracillima*. El subgrupo 2.1 está caracterizado por porcentajes de Poaceae entre 40-80%. *Rumex* y Asteraceae subf. Cichorioideae alcanzan los mayores valores (5-25%). Este subgrupo representa a la estepa húmeda que se desarrolla en sitios restringidos y en el ecotono con el bosque en el sector occidental. Constituye un pastizal homogéneo distribuido sobre suelos arenosos y ricos en materia orgánica. Los cojines de *Empetrum rubrum* Vahl ex Willdenow están representados con valores polínicos $< 5\%$. En el subgrupo 2.2 los valores de Poaceae varían entre < 40 y $< 80\%$ asociados con Brassicaceae ($< 20\%$), Cyperaceae, Caryophyllaceae y *Acaena* ($< 10\%$) y con taxones arbustivos de *Azorella*, *Nassauvia* y *Ephedra frustillata* Miers. ($< 5\%$). Las matas poco frecuentes de *Junellia tridens* (Lag.) Moldenke

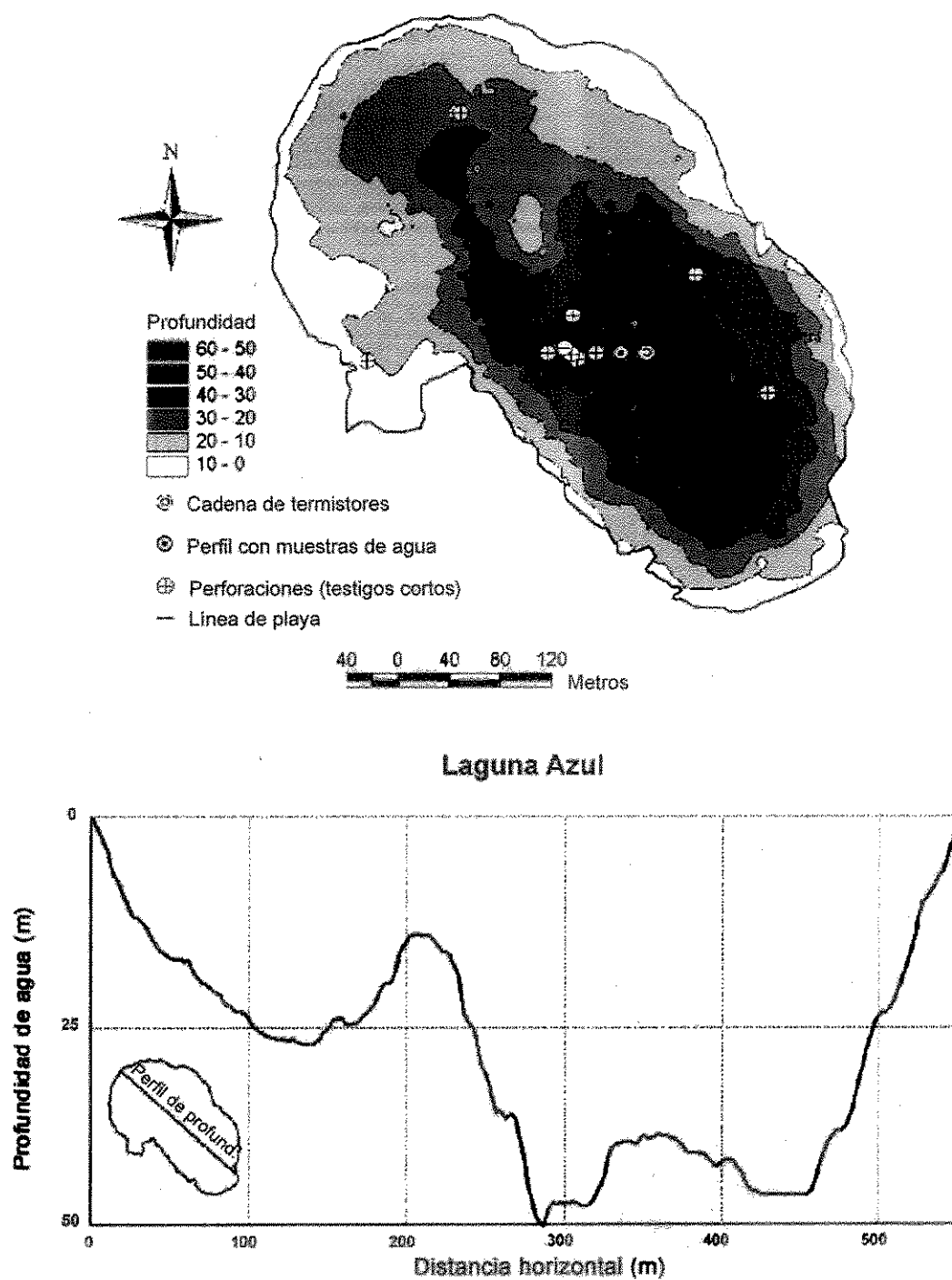


Fig. 3. Mapa batimétrico y corte transversal de la Laguna Azul.

Laguna Azul

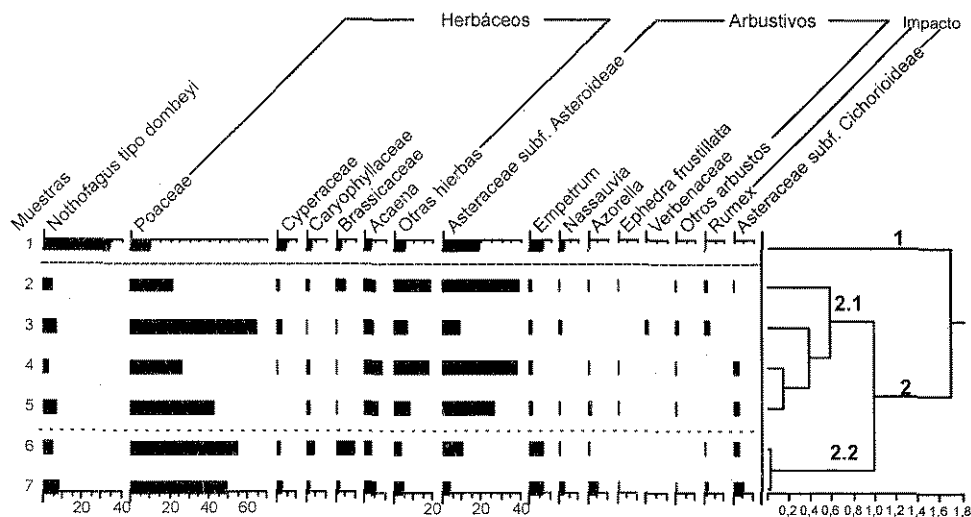


Fig. 4. Diagrama polínico porcentual y análisis de agrupamiento de las muestras actuales de la Laguna Azul.

están representadas con valores polínicos <10% (taxón agrupado en Otros arbustos). Esta asociación polínica representa a la estepa xérica occidental. En el subgrupo 2.3. Poaceae varía entre 25 y >70% asociada con Caryophyllaceae (25%), Asteraceae subf. Asteroideae (20%), *Nassauvia* y *Empetrum* (30%) y *Rumex* que alcanza valores < 10%. Esta composición polínica representa a la estepa gramínea xérica de la meseta oriental con cojines de *E. rubrum*. Este taxón y *Rumex* se asocian con condiciones de mayor disponibilidad hídrica en el extremo oriental del área de estudio.

En los espectros polínicos de las estepas, *Nothofagus t. dombeyi* presenta una tendencia decreciente desde la estepa húmeda a las estepas xéricas.

Edades radiocarbónicas de las lagunas volcánicas

Se asume que el testigo corto de la Laguna Azul representa los últimos 1.000 años y el proveniente de Potrok Aike ca. 2.000 años. Si bien los datos radiocarbónicos señalan reversiones en ambos perfiles, se hipotetiza que los últimos 15 cm de la Laguna Potrok Aike y los 53 cm superiores de la Laguna Azul representan el impacto humano en el área de investigación. Una interpretación más detallada de la calibración cronológica es discutida por Mayr *et al.* (m.s.) y Haberzettl *et al.* (m.s.).

Laguna Azul

Batimetría y sedimentos. La Laguna Azul está situada en el borde de un viejo cono de escoria

(ca. 190 m snm) y localizada en un cráter rodeado de altas paredes (>20 m) de material piroclástico (cenizas y lapilli) sobre su orilla. Las paredes interiores del cráter son escarpadas con ca. 40m de diferencia altitudinal entre la Meseta Patagónica circundante y la superficie de la laguna. Esta laguna no tiene aportes de agua por tributarios y presenta una forma elíptica con un diámetro máximo de 560 m y una profundidad máxima de 56 m (Fig. 4). La morfología abrupta del fondo y la presencia de una pared de 10-20 m de altura, formando un anillo, sugieren una edad más bien joven de la laguna (Zolitschka *et al.*, en prensa). El mapa batimétrico revela tres subcuencas, las cuales junto con la forma del cráter indican que esta estructura volcánica puede haberse formado durante tres erupciones individuales. La posición del fondo del lago está por debajo de la Meseta Patagónica circundante y la ausencia de flujos de lava indican ausencia de la producción de rocas volcánicas, excepto por la tefra. Estas características morfológicas pueden ser utilizadas como un indicador del origen freatomagmático del cráter, por ejemplo, como la formación de un maar.

La formación de varves en la secuencia estratigráfica puede relacionarse con el cambio en la contribución relativa de restos de vegetación lacustre y terrestre y de los componentes orgánicos e inorgánicos provenientes de suelos y del polvo de los sedimentos lacustres. Los primeros resultados de las muestras de sedimento superficial revelaron altos contenidos de materia

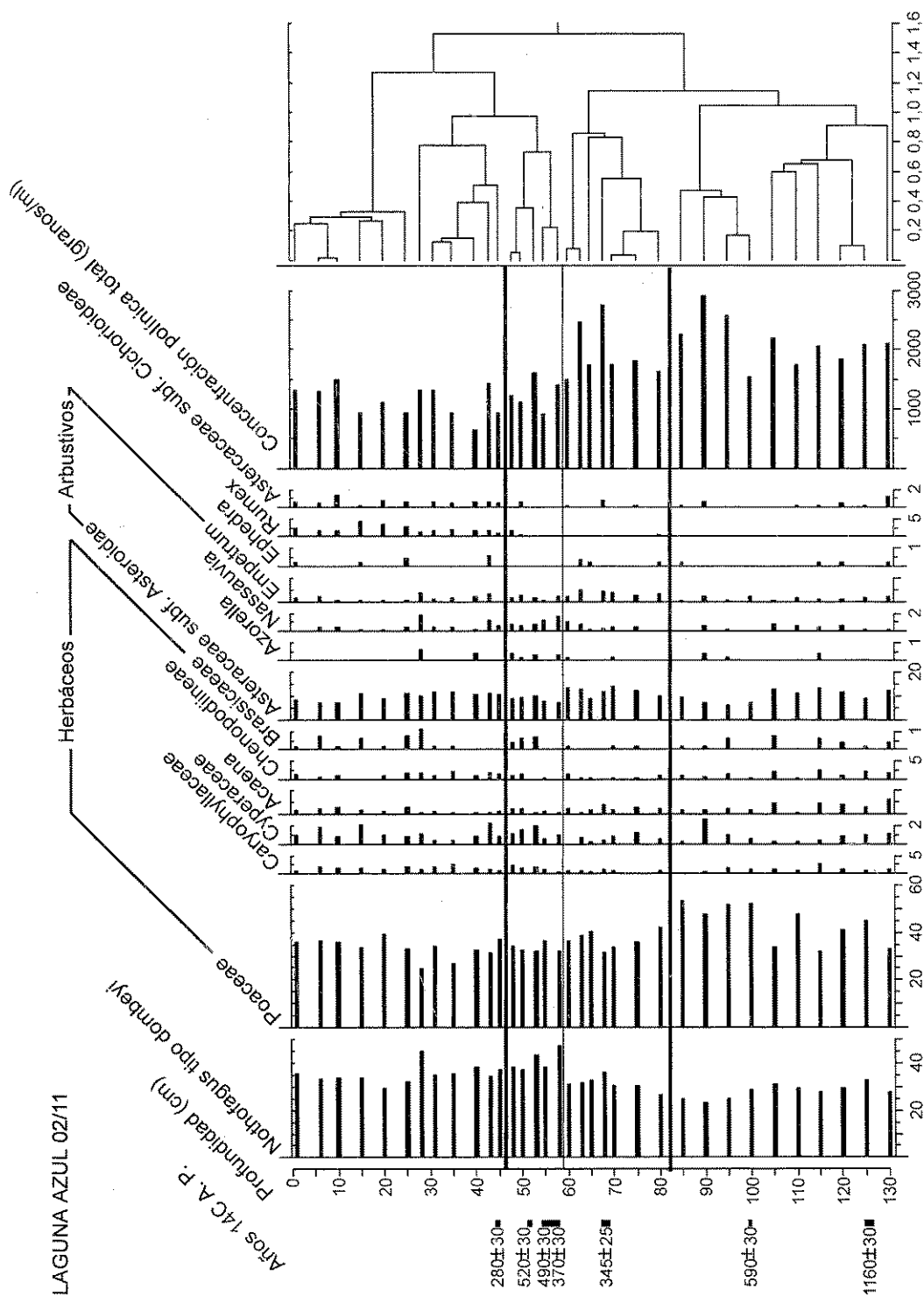


Fig. 5. Diagrama polínico porcentual y análisis de agrupamiento del testigo 02/11 de la Laguna Azul.

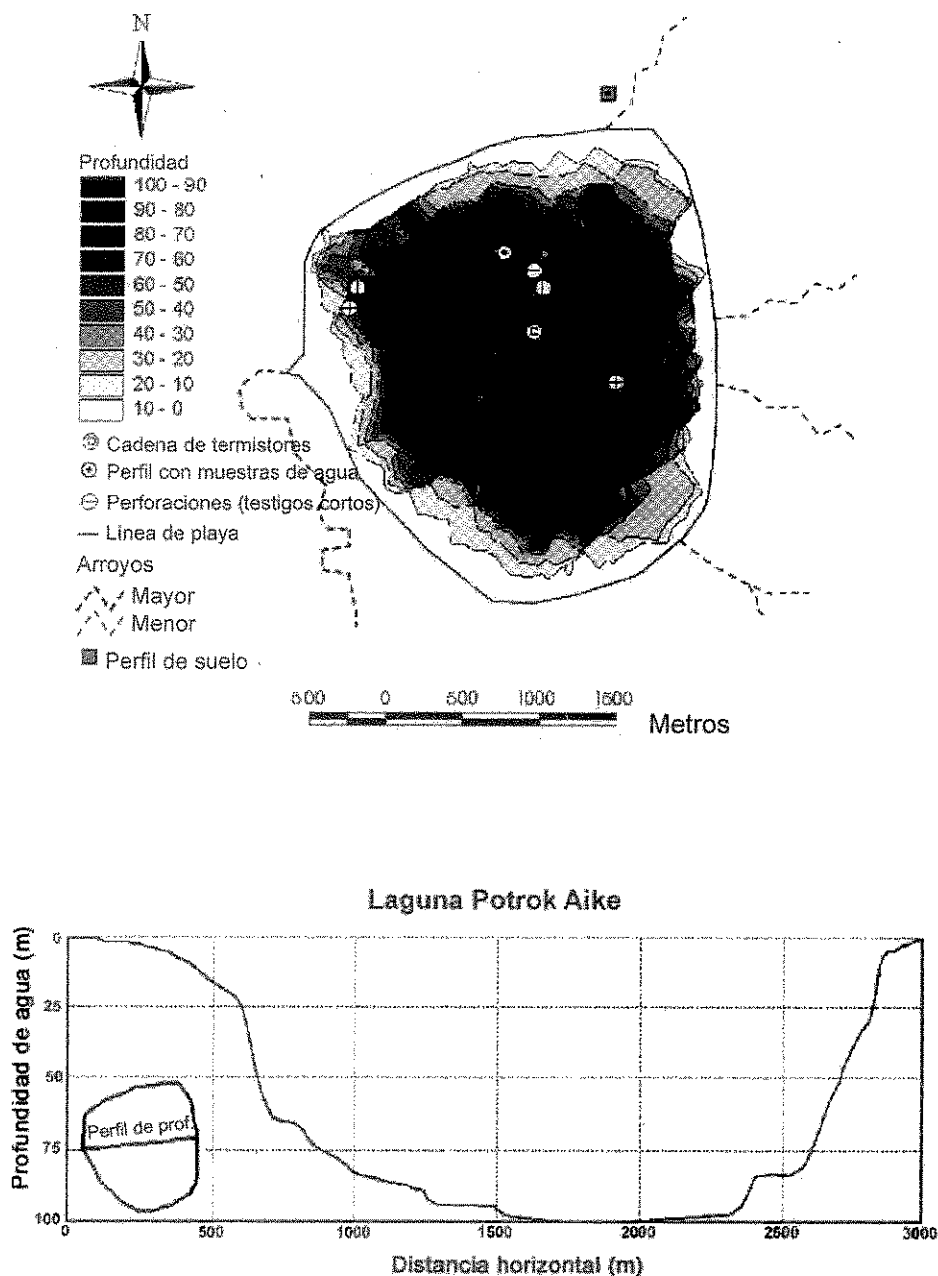


Fig. 6. Mapa batimétrico y corte transversal de la Laguna Potrok Aike.

orgánica (13,9% TOC) y de sílice biogénico (50% BSiO_2). Estos valores son indicativos de una alta producción primaria de algas durante los meses de verano.

Registros polínicos actuales y fósiles de los últimos 1.000 años

Los espectros polínicos actuales (Fig. 4) provenientes de la playa y de la planicie de inunda-

ción (muestras 1 y 2) presentan los menores valores de Poaceae (10-20%) y altos valores de Asteraceae subf. Asteroideae (20-40%). Los taxones herbáceos (Cyperaceae, Caryophyllaceae, Brassicaceae y *Acaena*) y los arbustivos presentan $\leq 5\%$, y *Nothofagus t. dombeyi* alcanza los mayores porcentajes (35%) de todos los espectros analizados. En la ladera y la meseta (grupo 2) predomina Poaceae con valores entre 25 y 65%. En la ladera (subgrupo 2.1) Asteraceae subf. Asteroideae presenta altos porcentajes (10-40%) asociados con otros taxones arbustivos ($< 2\%$). En la meseta (subgrupo 2.2) Asteraceae subf. Asteroideae decrece ($< 5-10\%$) y se incrementan *Empetrum*, *Nassauvia* y *Azorella* (5%). Ambos subgrupos presentan porcentajes similares de *N. t. dombeyi* ($< 10\%$), *Acaena* y Asteraceae subf. Cichorioideae ($\geq 5\%$). En Otras hierbas se agrupan Haloragaceae, Fabaceae, Labiatae, Rubiaceae, Plumbaginaceae, Valerianaceae, Geraniaceae, *Gunnera*, *Triglochin*, *Phacelia*, *Polemonium*, *Gomphrena* y *Plantago* con valores totales $\leq 20\%$.

En el perfil fósil (Fig. 6), entre la base y los 82.5 cm los valores de *N. t. dombeyi* varían entre 25-35% y Poaceae entre 35-55%. Después de una zona transicional (82,5-58 cm) los porcentajes de *N. t. dombeyi* se incrementan levemente (30-40%), Poaceae decrece (30-40%) y la concentración polínica total disminuye marcadamente. Entre los 53 cm y el tope de la secuencia aparece un registro continuo de *Rumex* y Asteraceae subf. Cichorioideae y también se incrementan los valores de *Pediastrum* y *Botryococcus* (ambos no incluidos en la Fig. 5).

Laguna Potrok Aike

Batimetría y sedimentos. La Laguna Potrok Aike (Fig. 6) es más extensa que la Laguna Azul. El diámetro del cráter es de alrededor de 5 km y no se evidencia preservación de una pared formando un anillo. Las paredes del cráter interno presentan una suave pendiente. La diferencia de elevación entre el nivel de la laguna y la Meseta Patagónica es de 50 m, la mitad de esta diferencia está ocupada por diferentes niveles de playa. Como ocurre en la Laguna Azul, el nivel de esta laguna se encuentra por debajo de la Meseta Patagónica circundante. Hacia el extremo sudeste del cráter existe un cono de escoria con un flujo de lava bien desarrollado hacia el sudoeste, que no penetra en el cráter. Esta característica podría indicar una tendencia a un extenso maar, el cual posiblemente puede estar asociado con el cono de escoria como un tipo de transición entre ambos fenómenos - maars y cono de escoria- (Büchel, 1993). Sin

embargo, la presencia de una diatrema necesita aún ser verificada. El diámetro de la laguna es de 3470 m y la máxima profundidad del agua es de 100 m, sin embargo la cuenca colectora es bastante extensa (ca. 200 km²) y extendida hacia Chile, lo que indica una enorme profundidad y tamaño inicial del cráter. Los numerosos arroyos que desembocan en la laguna provocarían un aporte sustancial de sedimento desde la cuenca colectora. La transecta E-O que atraviesa la laguna también revela una morfología casi plana del fondo lacustre. Todas estas evidencias indican una vasta y relativamente antigua erupción volcánica (Zolitschka et al., en prensa) que debe haber sido más joven que el último avance glacial en el área, el cual tiene una edad mínima de 360.000 años (Meglioli, 1992). La compleja mezcla del cuerpo de agua de la Laguna Potrok Aike es un indicador negativo para la formación de varves. Los contenidos de materia orgánica (1,9% TOC) y de sílice biogénico (1,5% BSiO₂) en los sedimentos superficiales difieren marcadamente de aquellos de la Laguna Azul e indican una tendencia hacia una baja productividad primaria.

Registros polínicos actuales y fósiles de los últimos 2.000 años

En los espectros polínicos actuales (Fig. 7) que provienen de la playa (grupo 1) y de la planicie de inundación y de la ladera (grupo 2) predominan Poaceae ($> 30-65\%$) y *Nothofagus t. dombeyi* que no supera el 20%. En los espectros polínicos de la playa *Ephedra frustillata* ($< 20\%$) está asociada con taxones arbustivos y herbáceos ($\leq 5\%$). En la planicie (subgrupo 2.1) Poaceae presenta los menores valores y se incrementan *Nassauvia* (5%), *Azorella* ($< 20\%$) y *Rumex* ($< 5\%$), asociados con trazas de *Ephedra frustillata* y con los taxones herbáceos Caryophyllaceae, Brassicaceae y *Acaena* ($\leq 5\%$). En los espectros de la planicie y de la ladera (subgrupo 2.2) se incrementan los porcentajes de Poaceae y Cyperaceae asociados con trazas de *Acaena*. En el nivel superior de la ladera se destaca *Ephedra frustillata* ($< 20\%$) asociada con los mayores valores de Asteraceae subf. Asteroideae ($< 10\%$). En ambos subgrupos *N. t. dombeyi* decrece ($\leq 10\%$). Las otras hierbas comprenden Ranunculaceae, Plumbaginaceae, Valerianaceae, Rubiaceae, *Adesmia*, *Trifolium*, *Lotus*, *Vicia*, *Medicago* y *Plantago*.

Los principales taxones en el registro fósil (Fig. 8) son *Nothofagus t. dombeyi* y Poaceae, como ocurre en la Laguna Azul. En esta secuencia se destacan varias fluctuaciones de corto tiempo en el sector superior del registro (40-0 cm) y un máximo de *N. t. Dombeyi* a 75 cm de profundidad. En

Laguna Potrok Aike

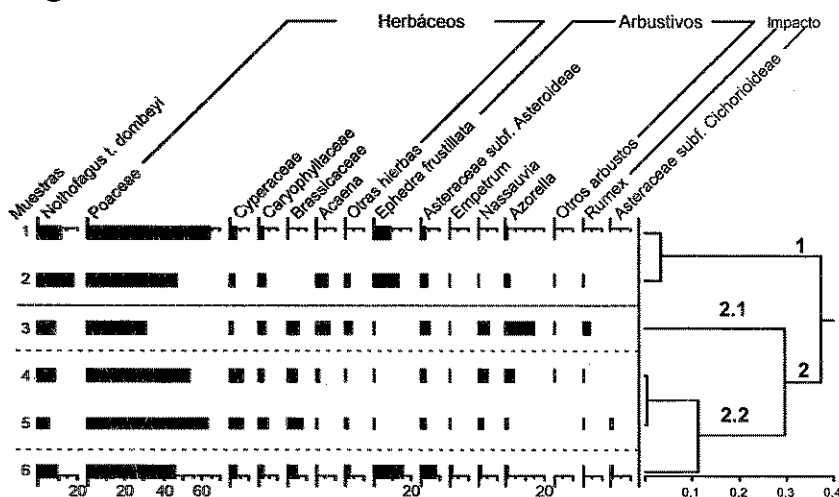


Fig. 7. Diagrama polínico porcentual y análisis de agrupamiento de las muestras actuales de la Laguna Potrok Aike.

general, *N. t. dombeyi* (20-30%) presenta porcentajes menores que en Laguna Azul. Poaceae domina la secuencia con porcentajes que varían entre 40-75%. Alrededor de los 15 cm de profundidad se evidencia un incremento de *Rumex* asociado con Asteraceae subf. Cichorioideae y *Pediastrum* (este último taxón no se presenta en la Fig. 8).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

A escala regional, las asociaciones polínicas actuales señalan una significativa correspondencia con el gradiente de precipitación y con las formaciones vegetales desde los Andes hasta la costa atlántica. Estos resultados corroboran que los cambios en las asociaciones polínicas son menos abruptos que los observados en la vegetación (Paez *et al.*, 2001) y garantizan su futura utilización en el modelado polen-clima. La estepa graminosa de *Festuca gracillima* presenta, de oeste a este, características fisonómico-florísticas diferenciadas. La distinción entre estepas húmeda y xérica, que ocurre próxima a la isohieta de 250 mm anuales, también está señalada en los agrupamientos polínicos por un descenso gradual de los porcentajes de Poaceae y por los taxones asociados. En el bosque y en la estepa húmeda, *Rumex* y Asteraceae subf. Cichorioideae presentan los mayores valores polínicos. Algunas especies de estos taxones se relacionan con disturbio antrópico. En general, el

ecotono bosque-estepa y los pastizales han sido alterados por sobrepastoreo ovino desde los primeros asentamientos europeos a fines del siglo XIX (Erikson, 1975; Liss, 1979; Aagesen, 2000) causando una extensa erosión del suelo y modificaciones en la vegetación. En los espectros polínicos de la estepa xérica oriental se destaca la presencia discontinua de tipos arbustivos que indicaría diferentes mosaicos de vegetación asociados con un incremento de los valores de *Rumex*.

Las lagunas Azul y Potrok Aike se localizan al este de la isohieta de 250 mm anuales, en la estepa xérica de *F. gracillima* (Roig *et al.*, 1985). Sin embargo, los resultados del análisis polínico regional indican que las muestras del área cercana a la Laguna Potrok Aike están incluidas en la estepa húmeda, mientras que las muestras próximas a la Laguna Azul representan a la estepa xérica oriental. Estas lagunas profundas de cuencas cerradas constituyen óptimos archivos paleoecológicos y paleoclimáticos que revelan una fuerte señal de los cambios ambientales y climáticos comparables con los registros de lagos de ambientes más húmedos. Estas señales han sido documentadas en las fluctuaciones de los niveles de playa de la Laguna Potrok Aike (Zolitschka *et al.*, en prensa). Sin embargo, estas evidencias geomorfológicas presentan dificultades en las dataciones y brindan una información paleoambiental restringida. Ambas lagunas presentan secuencias sedimentarias continuas

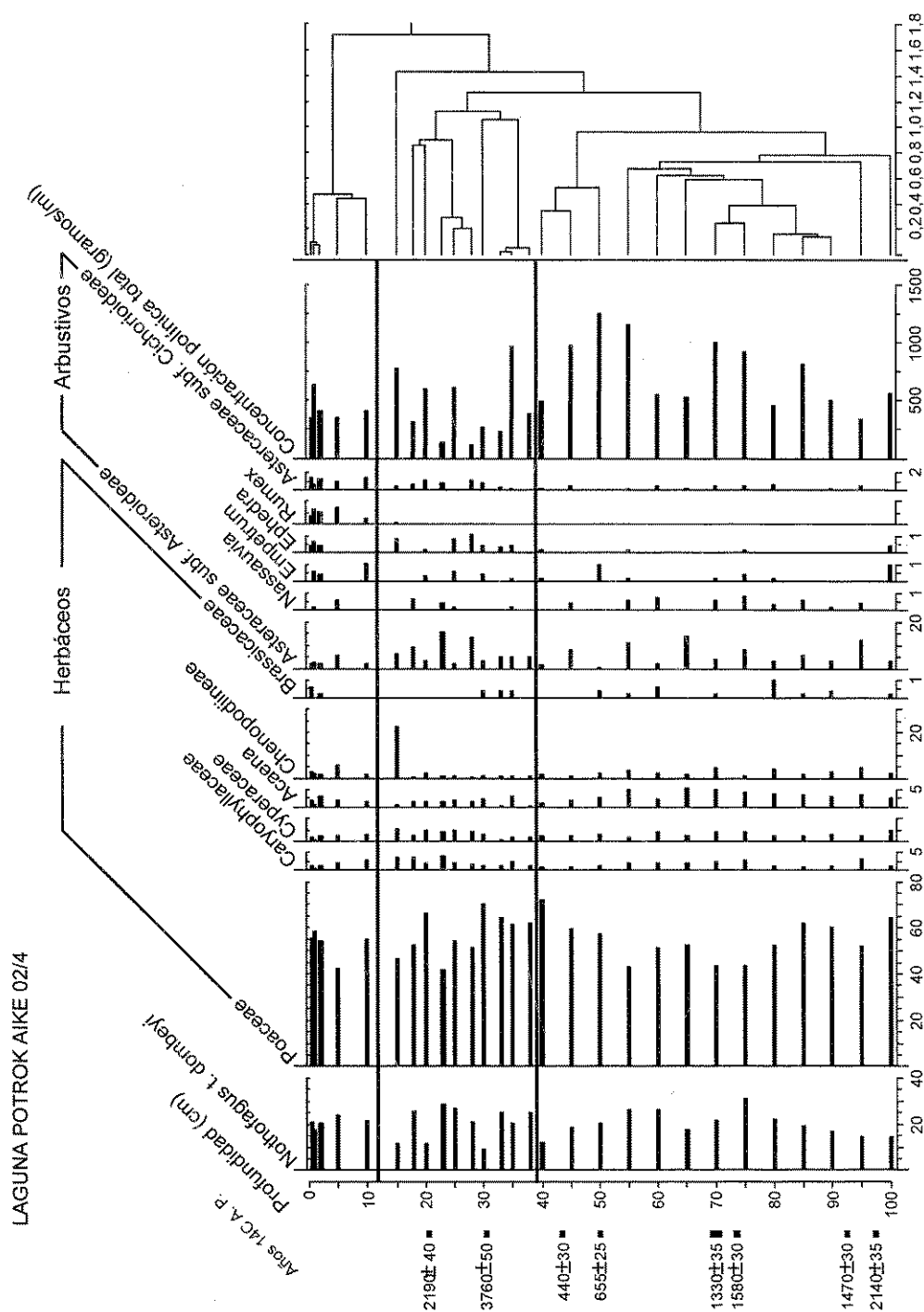


Fig. 8. Diagrama polínico porcentual y análisis de agrupamiento del testigo 02/4 de la Laguna Potrok Aike.

durante el Holoceno, mientras que la Laguna Potrok Aike también podría comprender varios ciclos glaciales e interglaciales. Estas diferencias en la edad, en el relleno sedimentario y en sus

ecosistemas, señalan el potencial de estas lagunas para realizar investigaciones comparativas de sus historias ambientales y climáticas.

A escala local, las comunidades vegetales que se

desarrollan desde el nivel de playa hasta la meseta están representadas en distintas asociaciones polínicas. La composición polínica actual y fósil en ambas lagunas es diferente y se relaciona principalmente con la distancia de las fuentes emisoras y la geomorfología propia de cada cuenca. La Laguna Azul se ubica a 130 km del bosque y la Laguna Potrok Aike a 80 km de esta formación vegetal. El mayor aporte de *Nothofagus t. dombeyi*, taxón extrarregional, ocurre en la playa de la Laguna Azul. Esta característica y los bajos valores en la composición polínica local se vincularían con una cobertura vegetal casi nula y/o con la profundidad del cráter que funcionaría como trampa del polen extrarregional transportado por el viento. Esta interpretación paleoambiental es extrapolable al registro fósil de esta laguna, donde los valores de *N. t. dombeyi* son mayores con respecto a la secuencia de Potrok Aike.

Si asumimos que las dataciones radiocarbónicas de los niveles inferiores de ambas secuencias son correctas, las fluctuaciones en los valores de Poaceae podrían indicar variaciones en la temperatura. Las bajas temperaturas provocarían un balance hídrico positivo con menor evapotranspiración en las regiones áridas del sur de Santa Cruz. En consecuencia, en la estepa gramínea de los alrededores de las lagunas se habría desarrollado una mayor cobertura vegetal que durante los intervalos de mayor temperatura. Este cambio en la cubierta gramínea podría estar evidenciado en los altos valores de concentración de los perfiles fósiles. El balance hídrico positivo también podría incrementar el nivel de las lagunas, lo cual está evidenciado en los análisis isotópicos y sedimentológicos (Mayr *et al.*, *m.s.*; Haberzettl *et al.*, *m.s.*). Esta interpretación comparada con los resultados de los espectros polínicos actuales regionales y de cada laguna es aún materia de discusión.

En la Laguna Potrok Aike, caracterizada por un relieve abierto y expuesto al viento, los valores polínicos actuales de *Nothofagus t. dombeyi* y Poaceae presentes en la playa son relativamente similares a los de los espectros fósiles de los últimos 15 cm de profundidad. Estos resultados sugieren que la vegetación de la playa no ha cambiado sustancialmente en los últimos 150-200 años. En los espectros polínicos actuales *Rumex* está presente en las planicies de inundación y laderas de ambas lagunas. La aparición de este taxón se destaca en los últimos 53 cm de profundidad de la Laguna Azul y 15 cm del perfil de Potrok Aike. El disturbio humano en los registros fósiles está sustentado por la

presencia de este taxón y por el incremento de los porcentajes de algas y la concentración de diatomeas (Mayr, *et al.*, *m.s.*; Haberzettl *et al.*, *m.s.*). Estos dos últimos datos *proxy* indican un alto influjo de nutrientes (condiciones eutróficas) causado probablemente por el uso de las lagunas como aguadas de las ovejas. Estos resultados preliminares indican el comienzo del pastoreo ovino en los últimos 120-130 años en el sur de Patagonia y su influencia en la dinámica ecológica de las lagunas. El sobrepastoreo influye en los porcentajes y concentración de Poaceae dado que los animales comen una parte considerable de los pastos antes que comience la floración. Sin embargo, futuros análisis palinológicos regionales proveerán información detallada sobre la dinámica de las estepas gramíneas en relación con el sobrepastoreo y los factores ambientales involucrados. Estos estudios posibilitarán la elaboración de mapas isopolínicos y de un modelo calibrado polen-clima que será utilizado como análogo moderno (Paez *et al.*, 2001) en la interpretación paleoclimática de las lagunas del PAFV.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen las sugerencias de M.M. Bianchi y P. Moreno, evaluadores del trabajo. B. Zolitschka y F. Schäbitz expresan especial agradecimiento a A. Amos (PROGEB, San Carlos de Bariloche), quien los alentó en el estudio de lagos en Patagonia. A V. Markgraf (INSTAAR, Universidad de Boulder) y a P. Bradbury (USGS, Denver) quienes invitaron en 1999 a ambos investigadores a realizar las primeras prospecciones en el PAFV. Este primer trabajo de campo fue financiado por el *Project Support for Bilateral Cooperation in Science and Technology* (ARG 013/98 GEO) del Centro Aeroespacial de Alemania (DLR-International Office). Las actividades de campo fueron posibles por la desinteresada colaboración de "nuestros guías locales", J. D. Moreteau (Puerto Madryn) y Ch. Kennard (Río Gallegos).

Este trabajo constituye una contribución a PAGES-PEP I (Transecta Polo-Ecuador-Polo en América), al Programa de Investigación Climática de Alemania (DEKLIM) y a los Proyectos de Investigación del Laboratorio de Paleocología y Palinología de la Universidad Nacional de Mar del Plata (15/E138, CONICET PIP 418/98, FONCYT PICT 07-6477). Los autores agradecen la financiación (Grants 01 LD 0034/0035) del Ministerio de Educación e Investigación del Gobierno de Alemania Federal (BMBF).

BIBLIOGRAFÍA

- Aagesen, D. 2000. Crisis and conservation at the end of the world: sheep ranching in Argentine Patagonia. *Environm. Conserv.* 27:208-215.
- Barros, V. R., B. V. Scian & H. F. Mattio. 1979. Campos de precipitación de la provincia de Chubut (1931-1960). *Geoacta* 10:175-192.
- Baruth, B., W. Endlicher & P. Hoppe. 1998. Climate and desertification processes in Patagonia. *Bamberger Geogr. Schr.* 15:307-320.
- Biddle, K.T., M.A. Uliana, R.M. Mitchum Jr., M.G. Fitzgerald & R.C. Wright. 1986. The stratigraphic and structural evolution of the central eastern Magallanes basin, southern South America. En: P. Allen y P. Homewood (eds.), *Foreland Basins. International Association of Sedimentologist, Special Publication* 8:41-61. London.
- Broecker, W. 1998. Palaeocean circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? *Paleoceanography* 13:119-121.
- Burgos, J.J. 1985. Clima del extremo Sur de Sudamérica. En: O. Boelcke, D.M. Moore & F.A. Roig (eds.), *Transecta botánica de la Patagonia Austral*, pp. 10-38. CONICET.
- Corbella, H. 1999a. Quimismo de las volcanitas de Pali Aike. Patagonia extrandina austral. 14º Congreso Geológico Argentino (Salta), *Actas* 2:269-272.
- 1999b. Dataciones radimétricas en Pali Aike, Patagonia Austral. 14º Congreso Geológico Argentino (Salta), *Actas* 2:265-268.
- Corbella, H. 2002. El campo volcano-tectónico de Pali Aike. En: M. Haller (Ed.), *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz*, pp. 285-302, Asociación Geológica Argentina. Buenos Aires.
- Corbella, H., A.M. Borromei & M. E. Quattrocchio. 2000. Quaternary climate changes in southernmost South America inferred from lacustrine sediments preserved in volcanic maars. En: P. Smolka & W. Volkheimer (eds.), *Southern hemisphere paleo- and neoclimates*, pp. 263-273, Springer, Berlin.
- Corbella, H., L. Chelotti & C. Pomposiello. 1996. Neotectónica del rift jurásico austral en Pali Aike, Patagonia extraandina, Santa Cruz, Argentina. 13º Congreso Geológico Argentino y 3º Congreso Exploración de Hidrocarburos (Buenos Aires), *Actas* 2:383-393.
- Denton, G.H., C.J. Heusser, T.V. Lowell, P.I. Moreno, B.G. Anderson, L.E. Heuser, C. Schlüchter & D.R. Marchant. 1999. Interhemispheric linkage of paleoclimate during the last deglaciation. *Geograf. Ann.* 81:107-153.
- Erikson, W. 1975. Störungen des Ökosystems patagonischer Steppen - und Waldregionen unter dem Einfluß von Klima und Mensch-Ökologie der Biosphäre. *Biographica* 1:57-73.
- Faegri, K. & J. Iversen. 1989. *Textbook of pollen analysis*, 4th. John Wiley & Sons (eds.), Chichester.
- Heusser, C.J. 1995. Three Late Quaternary pollen diagrams from Southern Patagonia and their palaeoecological implications. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 118:1-24.
- Hoffmann, J.A.J. 1975. Atlas climatológico de América del Sur. OMM-WMO-UNESCO, Hungría.
- Hueck, K. & P. Seibert. 1981. *Vegetationskarte von Südamerika*. Stuttgart, New York, Springer.
- León, R., D. Bran, M. Collantes, J. Paruelo & A. Soriano. 1998. Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecol. Austr.* 8:125-144.
- Liss, C.C. 1979. Die Besiedlung und Landnutzung Ostpatagoniens. *Göttinger Geograph. Abhandlungen* 73:240.
- Maidana, N.I. & H. Corbella. 1997. Análisis preliminar de las asociaciones de diatomeas cuaternarias en un paleolago volcánico, Santa Cruz austral, Argentina. 4º Congreso Brasileiro de Abequa (Curitiba), *Actas* :336-340.
- Mancini, M.V. 1993. Recent pollen spectra from forest and steppe of south Argentina: a comparison with vegetation and climate data. *Rev. Paleobot., Palynol.* 77:129-142.
- 1998. Vegetational changes during the Holocene in Extra-Andean Patagonia, Santa Cruz Province, Argentina. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 138:207-219.
- 2002. Vegetation and climate during the Holocene in South west Patagonia, Argentina. *Rev. Paleobot., Palynol.* 122:101-115.
- Markgraf, V. 1993. Paleoenvironments and paleoclimates in Tierra del Fuego and southernmost Patagonia, South America. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 102:53-68.
- McCulloch, R.D., M.J. Bentley, R.S. Purves, N.R.J. Hulton, D.E. Sugden & C.M. Clapperton. 2000. Climatic inferences from glacial and palaeoecological evidence at the last glacial termination, southern South America. *J. Quat. Sci.* 15: 409-417.
- Meglioli, A. 1992. Glacial geology and geochronology of southernmost Patagonia and Tierra del Fuego, Argentina and Chile. Ph.D. Dissertation, Leigh University, Bethlehem PA-USA, 216 pp. Inédito.
- Moore, D.M., 1983. *Flora of Tierra del Fuego*, Anthony Shropshire (ed), 396 pp.
- Müller-Dombois, D. & H. Ellenberg. 1974. *Aims and methods of vegetation ecology*. John Wiley & Sons. USA, pp. 67-92.
- Paez, M.M., F. Schäbitz & S. Stutz. 2001. Modern pollen-vegetation and isopoll maps in southern Argentina. *J. Biogeog.* 28:997-1021.
- Pisano, E. 1985. Tipos de vegetación y fitoclimas en la transecta botánica de Patagonia Austral. En: O. Boelcke, D.M. Moore & F.A. Roig (eds.), *Transecta botánica de la Patagonia Austral*, pp. 541-556. CONICET.
- Prieto, A.R., S. Stutz, & S. Pastorino. 1998. Vegetación del Holoceno en la Cueva Las Buitreras, Santa Cruz, Argentina. *Rev. Chil. Hist. Natural.* 71:277-290.
- Roig, F. A., J. Anchorena, O. Dollenz, A. M Faggi & E. Méndez. 1985. Las comunidades vegetales de la Transecta Botánica de la Patagonia Austral. Primera parte: la vegetación del área continental. En: O. Boelcke, D.M. Moore & F.A. Roig (eds.), *Transecta botánica de la Patagonia Austral*, pp. 350-456. CONICET.

- Roig, F. A. 1998. La vegetación de la Patagonia. En: M. Correa (ed.), *Flora Patagónica*. Colección Científica, 8(1):48-166. INTA.
- Schäbitz, F. 1991. Holocene vegetation and climate in southern Santa Cruz, Argentina. *Bamberger Geogr. Schr.* 11:235-244.
- 1999. Paläoökologische Untersuchungen an geschlossenen Hohlformen in den Trockengebieten Patagoniens. *Bamberger Geogr. Schr.* 239 pp.
- Seibert, P. 1985. Ordenamiento Fitogeográfico y Evaluación Territorial. En: O. Boelcke, D.M. Moore & F.A. Roig (Eds.), *Transecta botánica de la Patagonia Austral*, pp. 520-539. CONICET.
- Skewes, M.A. & C.R. Stern. 1979. Petrology and geochemistry of alkali basalts and ultramafic inclusions from the Pali Aike volcanic field in southern Chile and the origin of the Patagonian plateau lavas. *J. Volcanol. Geother. Res.* 6:3-25.
- Sträßler, M. 1999. Klimadiagramm-Atlas der Erde. Teil 2: Asien, Lateinamerika, Afrika, Australien, Ozeanien und Polarländer. Dortmund.
- Uliana, M.A. & T. Biddle. 1988. Mesozoic-Cenozoic paleogeographic and geodynamic evolution of southern South America. *Rev. Brasil. Geosci.* 18:172-190.
- Valdes, P.J. 2000. South American palaeoclimate model simulations: how reliable are the models? *J. Quat. Sci.* 15: 357-368.
- Weischet, W. 1996. Regionale Klimatologie. *Die neue Welt*. Teubner, Stuttgart, 468 pp.
- Zolitschka B., F. Schäbitz, A. Lücke, G. Clifton, H. Corbella, B. Ercolano, T. Haberzettl, N. Maidana, C. Mayr, C. Ohlendorf, G. Oliva, M. M. Paez, G. H. Schleser, J. Soto, P. Tiberi & M. Wille. En prensa. Palaeoecological potential of crater lakes in the Pali Aike Volcanic Field, southern Patagonia (Argentina). *J. South Am. Earth Sci.*

Recibido: 11-VII-2003

Aceptado: 28-XI-2003