

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

# Reconstrucción espacial y temporal de la ocurrencia de avalanchas de nieve en los Andes patagónicos utilizando técnicas dendrocronológicas

## Dendrochronological reconstruction of spatial and temporal patterns of snow avalanches in the Patagonian Andes

ALEJANDRO CASTELLER<sup>1,2,\*</sup>, RICARDO VILLALBA<sup>1</sup>, ANDREA MAYER<sup>2</sup> & VERONIKA STÖCKLI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales IANIGLA, CONICET, C. C. 330, 5500 Mendoza, Argentina

<sup>2</sup> WSL, Instituto para la Investigación de la Nieve y las Avalanchas SLF, Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos Dorf, Suiza

\* Autor correspondiente: casteller@mendoza-conicet.gov.ar

### RESUMEN

Las avalanchas de nieve representan un importante riesgo natural en diversas regiones montañosas alrededor del mundo. Daños a infraestructura y pérdidas de vidas humanas son reportados frecuentemente en relación a eventos catastróficos de avalanchas. En los Andes, numerosas obras de infraestructura se ubican en zonas vecinas a senderos de avalanchas, de las que poco se conoce sobre sus alcances máximos, periodos de retorno y presiones de impacto. A través de la implementación de técnicas dendrocronológicas hemos reconstruido las fechas de ocurrencia y áreas de influencia de eventos pasados de avalanchas de nieve. Ejemplares de *Nothofagus pumilio* con perturbaciones visibles de avalanchas fueron muestreados en sectores del canal, bordes y zonas de frenado de 11 senderos de avalanchas ubicados en Loma de las Pizarras, próximo a El Chaltén, Santa Cruz, Argentina. Además, áreas de control fueron muestreadas para determinar las condiciones de crecimiento en árboles no afectados por avalanchas. Nuestros análisis indican que las cicatrices, las variaciones de excentricidad en el leño, los cambios abruptos de crecimiento y la presencia de leño de tensión son los principales indicadores dendrocronológicos en *N. pumilio* asociados a la ocurrencia de avalanchas. Basados en una ponderación cuantitativa de los indicadores y en la profundidad de muestreo, calculamos un índice de ocurrencia de eventos, el cual nos permitió determinar para cada sendero los años con ocurrencia de avalanchas. Considerando de manera integral la actividad de avalanchas en los 11 senderos muestreados, los años con mayor ocurrencia de eventos fueron 1936, 1966, 1978 y 1995. Complementariamente, registros climáticos fueron analizados con el objetivo de determinar las relaciones entre los años con ocurrencia de avalanchas y las variaciones mensuales de precipitación y temperatura. Se observa que los años con gran frecuencia de avalanchas están significativamente correlacionados con la ocurrencia de abundantes precipitaciones invernales; no se detectaron relaciones significativas con las variaciones de temperatura. Los resultados alcanzados en esta investigación prueban el potencial dendrocronológico de *N. pumilio* para reconstruir patrones espaciales y temporales de avalanchas de nieve en los Andes patagónicos.

**Palabras clave:** avalanchas de nieve, dendrocronología, *Nothofagus pumilio*, Andes patagónicos.

### ABSTRACT

Snow avalanches are a major natural hazard in a large number of mountainous regions around the world. Every year, infrastructure is destroyed and human lives lost as a consequence of catastrophic avalanche events. Numerous roads and settlements in the Andes are located adjacent to avalanche tracks, for which little is known about maximum extents, return periods or impact pressures. Utilizing dendrochronological techniques we were able to reconstruct the occurrence dates and affected areas of past snow avalanche events. Individual *Nothofagus pumilio* trees with visible damage of past avalanche disturbances were sampled in the tracks, borders and run-out zones of 11 avalanche tracks located at Loma de las Pizarras, near El Chaltén, Santa Cruz, Argentina. In addition, control sites were sampled to determine the growth patterns of undisturbed trees. Our analyses indicate that scars, eccentricity variations in the wood, abrupt growth changes and reaction wood are the main indicators associated with avalanche disturbances in *N. pumilio*. Based upon a quantitative weighting of the different indicators and on the sampling depth, we calculated an index of avalanche occurrences for each avalanche track. Considering the avalanche activity at the 11 studied tracks, the years with the largest number of events were 1936, 1966, 1978 and 1995. In addition, climatic records

were analyzed to explore the relationships between avalanche events and monthly precipitation and temperature variations. The years with the largest number of avalanche events are significantly correlated with abundant precipitation; relationships with temperature variations were not recorded. The results of this study confirm the dendrochronological potential of *N. pumilio* for reconstructing spatial and temporal patterns of snow avalanche events in the Patagonian Andes.

**Key words:** snow avalanches, dendrochronology, *Nothofagus pumilio*, Patagonian Andes.

## INTRODUCCIÓN

Las avalanchas de nieve son un riesgo natural de gran importancia en numerosas regiones montañosas alrededor del mundo. En los Andes, una gran cantidad de obras edilicias y carreteras se ubican en zonas vecinas a senderos de avalanchas, poco conocidas en cuanto a sus alcances máximos, periodos de retorno o presiones de impacto, entre otros parámetros de importancia a tener en cuenta. En contados centros de deportes invernales y ciertos pasos de montaña se ha comenzado a recopilar información relevante a las avalanchas (Leiva & Martínez 1998, 2006). Más aún, la constante expansión territorial de la población en áreas de montaña en respuesta a la fuerte presión turística raramente se basa en un ordenamiento territorial que considere los riesgos regionales de avalanchas.

La dendrocronología es una poderosa herramienta utilizada como registro proxy para reconstruir la ocurrencia de riesgos naturales tales como las avalanchas de nieve (e.g. Burrows & Burrows 1976, Carrara 1979), los flujos de detrito (e.g. Hupp 1984, Bollschweiler et al. 2007) y los procesos de caída de rocas (e.g. Butler et al. 1986, Stoffel et al. 2005). Las reconstrucciones dendrocronológicas de avalanchas de nieve pueden extenderse en ciertos casos varios siglos y cuentan con la ventaja de poseer el carácter de datación absoluta, lo cual resulta muy difícil o imposible de lograr empleando otras técnicas de fechado. Estos archivos dendrocronológicos resultan sumamente útiles para elaborar cronologías de avalanchas en sitios forestados sin registros de eventos pasados, o para complementar registros históricos cortos o fragmentados.

Distintos tipos de perturbaciones, como por ejemplo la inclinación y el enterramiento de fustes, han sido vinculados a respuestas vegetacionales en forma de cambios abruptos de crecimiento y formación de leño de reacción (Shroder 1980). La supresión del crecimiento en árboles ubicados a lo largo de senderos de

avalanchas puede ser una respuesta a cambios en la disponibilidad hídrica del suelo (Potter 1969), a una reducción del área fotosintética por roturas de ramas y pérdida de follaje (Rayback 1998) y/o a daños al sistema radicular de los árboles (Gers et al. 2001). Contrariamente, las liberaciones de crecimiento han sido asociadas a un aumento en la actividad fotosintética resultante de una mayor disponibilidad de luz, agua y/o nutrientes como resultado de la muerte de árboles vecinos por las avalanchas (Smith 1973) o al aumento en la humedad del suelo debido al depósito de nieve remanente de las avalanchas (Butler 1979), el cual puede permanecer varios meses hasta bien entrada la primavera.

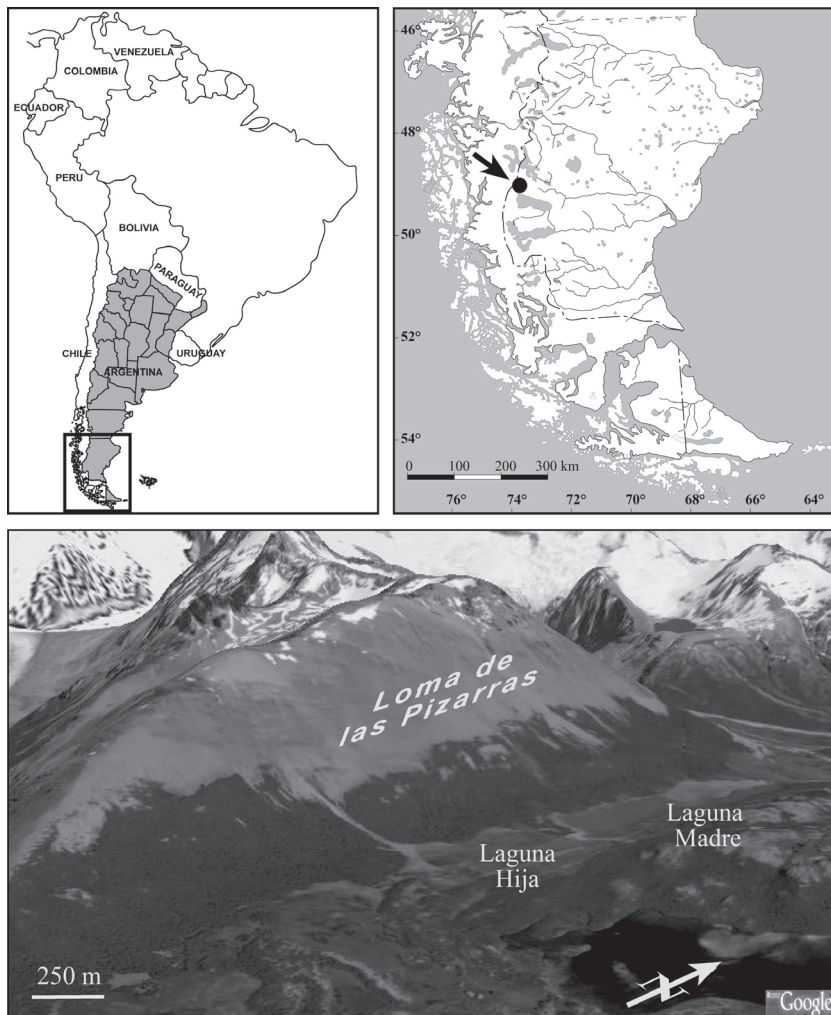
De acuerdo a las especies de árboles estudiadas, ciertos indicadores dendrocronológicos de ocurrencia de avalanchas cobran más utilidad que otros. La gran mayoría de las reconstrucciones relacionadas con el fechado de eventos y determinación de áreas afectadas por avalanchas se ha realizado con coníferas, en las que la formación de leño de reacción (Shroder 1978), canales resiníferos (Stoffel et al. 2006), cicatrices (Casteller et al. 2007), variaciones de excentricidad en el leño (Stoffel & Bollschweiler 2008) y cambios abruptos de crecimiento (Potter 1969) son relevantes. Sin embargo, contados estudios (Bebi et al. 2004, Mundo et al. 2007, Casteller et al. 2008) han evaluado la utilidad y precisión de los distintos indicadores dendrocronológicos en latifoliadas que permiten reconstruir la actividad de las avalanchas. Por ejemplo, las coníferas difieren de las latifoliadas en cuanto al tipo de leño de reacción que producen al ser inclinadas por efecto de una avalancha: en las coníferas, el leño de reacción es denominado "leño de compresión" y se forma típicamente en aquella cara del fuste orientada ladera abajo (hipotrópica); el leño de reacción en latifoliadas se denomina "leño de tensión" y se forma en la parte superior (epitrópica) del fuste. La ausencia de canales resiníferos en

latifoliadas representa otra limitante en la reconstrucción de eventos.

La estacionalidad en la formación de las cicatrices puede ser utilizada para determinar si el daño sufrido por un árbol ocurrió en invierno por una avalancha, o por otros procesos de disturbio (e.g. caídas de rocas, flujos de detritos) durante la estación activa de crecimiento. En los eventos invernales, el callo de cicatrización se produce durante la siguiente estación de crecimiento y por ello se posiciona

antes del inicio en la formación del leño temprano. Por el contrario, en aquellas cicatrices formadas durante la estación activa de crecimiento, el callo de cicatrización puede estar ubicado tanto en el leño temprano como en el leño tardío (Stoffel et al. 2006).

En este estudio se reconstruye la ocurrencia de avalanchas de nieve en numerosos senderos de los Andes patagónicos, evaluando distintos indicadores dendrocronológicos presentes en *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser



**Fig. 1:** Ubicación del sitio de estudio Loma de las Pizarras. La ladera muestreada abarca un rango altitudinal que va de los 700 msnm (al nivel de las lagunas Madre e Hija) a los 1500 msnm, encontrándose el límite superior de la vegetación arbórea, compuesto exclusivamente por *Nothofagus pumilio*, a 1050 msnm aproximadamente. Fuente de la imagen satelital: Google Earth (permiso 242431704).

Location of the study site “Loma de las Pizarras”. The sampled slope ranges from 700 m (at the level of the lagunas Madre e Hija) to 1500 m. The *Nothofagus pumilio* treeline is located at approximately 1050 m. Source of satellite image: Google Earth (permission request 242431704).

(lenga). Entre ellos encontramos cicatrices, variaciones de excentricidad en el leño, cambios abruptos de crecimiento y leño de reacción. Registros climáticos regionales fueron analizados con el objetivo de determinar las relaciones existentes entre la ocurrencia de avalanchas y las variaciones mensuales en la precipitación y la temperatura.

## MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio se ubica vecina a la localidad de El Chaltén, Parque Nacional Los Glaciares, Santa Cruz, Argentina. Los muestreos dendrocronológicos se realizaron en ejemplares de *Nothofagus pumilio* ubicados en una ladera al oeste de las lagunas Madre e Hija, conocida como Loma de las Pizarras (49°18' S, 72°57' O; Fig. 1). Si bien hay cicatrices en el bosque que indican la ocurrencia de avalanchas frecuentes, no existen referencias históricas de eventos en el sitio.

La precipitación media anual registrada en la seccional de la Administración de Parques Nacionales en El Chaltén (405 msnm, periodo 1992-2001) es de 438 mm (Fig. 2). El gradiente de precipitación en esta región es muy marcado, por lo que estimamos que en Loma de las Pizarras, a solo 6,5 km al oeste de El Chaltén, la precipitación total anual excede los 700 mm (Dimitri 1972). La temperatura media anual, medida con un data logger ubicado en

las cercanías de la laguna Torre (670 msnm, período marzo de 2002 a febrero de 2004), a 4 km de Loma de las Pizarras, es de 4,46°C.

La vegetación arbórea en la zona del El Chaltén está dominada por bosques de *Nothofagus pumilio*. *Nothofagus antarctica* (G. Forster) Oerst. (ñirre) y *Lomatia hirsuta* (Lam.) Diels ex Macbr. (radal) se encuentran también presentes pero en menor proporción. A *N. antarctica* se lo encuentra en todos los pisos altitudinales del bosque, mientras que *L. hirsuta* está presente en el bosque bajo entre 400 y 500 msnm, aproximadamente. En los senderos de avalanchas muestreados encontramos exclusivamente a *N. pumilio*. Esta especie adopta distintas formas y alturas en función de la carga nival (Eskuche 1973) y según intensidad y la frecuencia del daño causado por los deslizamientos de nieve. En la base de las laderas con elevaciones cercanas a los 700 msnm, los árboles alcanzan hasta 15-18 m de altura. La altura de los árboles va disminuyendo progresivamente a medida que ascendemos, hasta encontrarnos con individuos de forma achaparrada (o "krummholz") en el límite altitudinal del bosque (a 1050 msnm, aproximadamente), que raramente superan los 2 m de altura. Árboles con sus troncos en forma de "J" se observan típicamente en altitudes intermedias, allí donde el manto nival, aun cuando no cubre totalmente los árboles, afecta el normal crecimiento de los mismos. La forma de "J" de los fustes en *N. pumilio* responde a su vez a procesos de soliflucción ocurridos en el suelo (Nyberg 1985, Larocque et al. 2001).

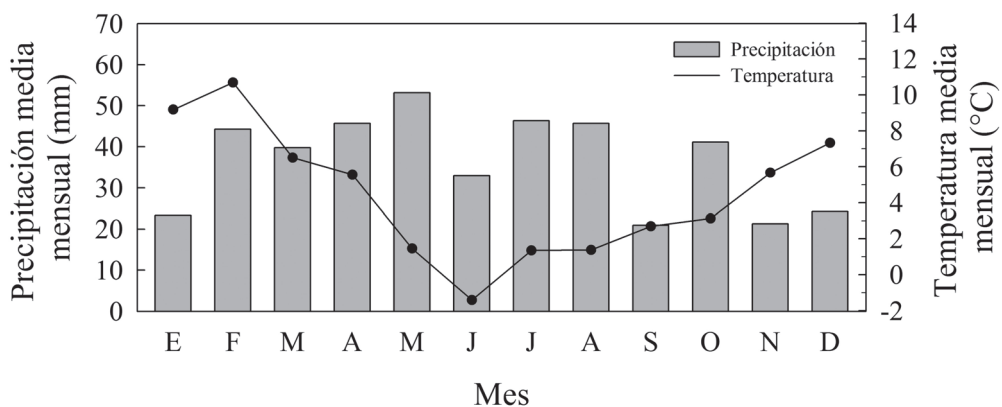


Fig. 2: Precipitación mensual (mm) y temperatura media mensual (°C) para los periodos 1992-2001 y 2002-2004, respectivamente, medidos en estaciones cercanas al sitio de estudio.

Total monthly precipitation (mm) and mean monthly temperature (°C) for the periods 1992-2001 and 2002-2004, respectively, measured near the study area.

Geológicamente, la zona de Loma de las Pizarras responde a un plegamiento del Cretácico Inferior, representado por una secuencia de pelitas, rocas calcáreas y areniscas subordinadas de hasta 4500 m de espesor, con fósiles marinos (Zanettini et al. 1999). En dirección oeste y hasta la zona borde del Monte Fitz Roy (abarcando a Loma de las Pizarras), encontramos rocas volcánicas de la edad Jurásica, que constituyen una de las unidades de mayor desarrollo en la región patagónica al sur de los 40° de latitud. Estas rocas se distribuyen con gran continuidad en el flanco oriental de la cordillera patagónica y sobreyacen discordantemente a rocas metamórficas paleozoicas; corresponden a ignimbritas, tobas, lavas y domos de composición riolítica, riodacítica, dacítica y, en forma subordinada, a andesitas y basaltos con delgadas intercalaciones de rocas sedimentarias marinas y continentales.

#### *Análisis estereoscópicos*

El análisis estereoscópico de pares fotográficos (año 1968 a escala 1:72000, año 1981 a escala 1:70000) en varias laderas de la región permitió identificar estructuras boscosas afectadas por avalanchas de nieve. Dichas estructuras se aprecian como parches longitudinales sin vegetación (o con vegetación de bajo porte) orientados de forma paralela a la pendiente y comenzando en la zona en que la avalancha irrumpe en el bosque (Weir 2002). Esta metodología facilitó la selección de Loma de las Pizarras como sitio de muestreo, dada la gran cantidad de senderos de avalanchas en ella presentes. Visitas a campo posteriores confirmaron las apreciaciones alcanzadas por el análisis estereoscópico.

#### *Muestreos dendrocronológicos*

En febrero de 2003 se muestrearon 11 senderos de avalanchas (Fig. 3). El criterio de muestreo se basó en seleccionar árboles de *N. pumilio* ubicados en distintos sectores de los senderos con daños externos (e.g. cicatrices, roturas de troncos o ramas, raíces expuestas) asociados a perturbaciones por avalanchas de nieve. A su vez, distintas áreas de control fueron muestreadas con el fin de establecer el patrón de crecimiento de árboles de *N. pumilio* bajo similares condiciones de clima, suelo,

orientación de ladera y pendiente, pero sin signos evidentes de afectación por avalanchas.

Tres tipos de muestras fueron obtenidos: secciones transversales, cuñas y muestras de barreno. Los dos primeros tipos de muestras se tomaron con serruchos de mano o motosierra y el tercer tipo con barrenos de incremento de 5 mm de diámetro (Tabla 1). Las secciones transversales fueron obtenidas siempre que esto fuera posible, dada su mayor potencialidad para registrar las perturbaciones en el bosque. Las muestras de barreno se obtuvieron principalmente en los sitios de control y eventualmente en los bordes de los senderos, tratando de esta manera de reducir el daño causado a los árboles por el muestreo con serruchos o motosierras. Todos los árboles muestreados se encontraban vivos al momento de muestreo. La posición de cada árbol muestreado fue registrada a través de croquis de campo y con el uso de navegadores satelitales.

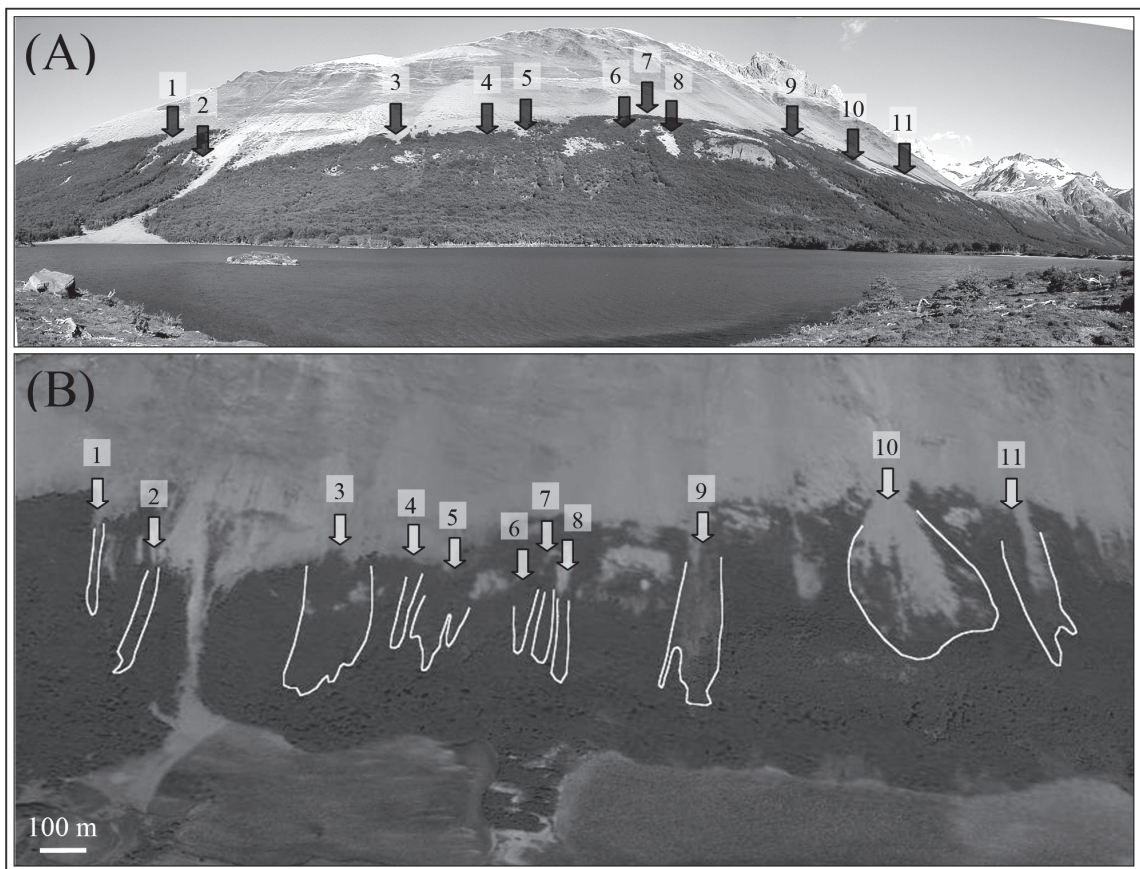
#### *Preparación de las muestras y análisis dendrocronológicos*

Las muestras de *N. pumilio* colectadas en los distintos senderos de avalanchas fueron preparadas siguiendo los procedimientos dendrocronológicos convencionales (Stokes & Smiley 1968). Esto incluyó el montaje de las muestras de barreno en portamuestras acanalados y su posterior secado, junto con el secado de las secciones transversales y de las cuñas, a temperaturas variables entre 20° C y 25° C. Las muestras de barreno fueron posteriormente preparadas con una lijadora manual utilizando granulometrías ascendentes de papel (de entre 200 y 1200 granos cm<sup>-2</sup>); las secciones transversales y las cuñas se trataron primeramente con una lijadora de banda, para luego ser terminada su preparación con una lijadora manual utilizando también granulometrías ascendentes de papel (de entre 200 y 800 granos cm<sup>-2</sup>). Una vez lograda la perfecta visualización de los anillos de crecimiento, las muestras fueron fechadas (i.e. asignación de un año calendario a cada anillo de crecimiento anual) bajo la lupa con aumentos variables de entre 6x y 50x. El procedimiento de fechado siguió la convención de Schulman (1956) para el hemisferio Sur, la cual asigna a cada anillo anual el año calendario en el cual se inició el crecimiento.

Los anillos de crecimiento fueron medidos con una precisión de 0,01 mm utilizando el programa TSAP-Win (Rinn 1996) y el banco de medición LINTAB. En las secciones transversales se midió un número variable de radios: en aquellas muestras con cicatrices se midió comúnmente un radio opuesto a la cicatriz (utilizado este para co-fechar las muestras entre sí) y otro radio en uno de los sobrecrecimientos típicamente producidos por la cicatriz; en secciones transversales con una marcada excentricidad por la formación de leño de reacción se midieron dos radios, uno orientado ladera arriba y el otro orientado ladera abajo.

Para detectar errores de fechado debido a la ocurrencia de anillos ausentes, falsos

anillos o a fallas en el proceso de medición (Wiles et al. 1996), las series de ancho de anillos se co-fecharon visualmente. La calidad del fechado fue controlada utilizando el programa COFECHA (Holmes 1983) y la función gráfica del programa TSAP-Win. Las series de ancho de anillos de los sitios de control fueron utilizadas como referencia durante el procedimiento de co-fechado. El programa ARSTAN (Cook 1985) se utilizó para elaborar las cronologías de referencia; en estas cronologías se eliminó la tendencia biológica de crecimiento empleando funciones de ajuste cúbico y se minimizaron las variaciones de ancho de anillos no comunes a todos los árboles muestreados en el sitio (Fritts 1976).



*Fig. 3:* (A) Fotografía panorámica del sitio de estudio. Las flechas indican los 11 senderos de avalanchas muestreados. (B) Delimitación de los bordes y zonas de frenado de las avalanchas sobre una imagen satelital Google Earth de la zona.

(A) Panoramic photograph from the study site. The arrows indicate the 11 sampled avalanche tracks. (B) Delimitation of the borders and run-out zones of the different avalanche tracks on a Google Earth satellite image of the area.

TABLA 1

Descripción de la cantidad y tipo de muestras de *Nothofagus pumilio* obtenidas. En total se muestrearon 11 senderos de avalanchas. Los senderos incluyeron distintos sectores y subsectores de muestreo.

Number and type of samples of *Nothofagus pumilio* collected at the study site. A total of 11 avalanche tracks were surveyed. The avalanche tracks were sampled in different sectors and subsectors.

Código del sendero	Elevación base del sendero (msnm)	Sector	Subsector	Árboles muestreados	Secciones transversales	Cuñas	Muestras de barreno
LP1	850	Canal	—	11	1	0	17
LP2	800	Canal	—	6	6	0	0
		Borde	—	6	0	1	10
		Control	—	6	0	0	11
LP3	770	Borde	Borde 1	7	6	0	6
			Borde 2	6	6	0	2
		Frenado	—	4	0	0	6
LP4	815	Canal	—	3	3	0	0
LP5	790	Canal	—	5	3	0	5
		Borde	—	2	0	0	3
LP6	820	Canal	—	7	4	0	9
		Borde	—	3	0	0	7
LP7	810	Canal	—	4	4	0	0
		Borde	—	1	1	0	0
LP8	790	Canal	—	7	0	0	8
		Borde	—	6	0	0	10
LP9	780	Canal	Canal 1	2	2	0	0
			Canal 2	5	5	0	0
			Canal 3	5	5	0	0
		Borde	Borde 1	3	3	0	0
			Borde 2	5	0	0	9
		Control	—	5	0	0	9
LP10	850	Frenado	—	3	3	0	0
LP11	835	Canal	—	3	3	0	0
		Borde	—	3	3	0	0
Totales				117	58	1	112

En cada una de las muestras analizadas se determinó y/o cuantificó: (1) la ocurrencia de cicatrices, tanto visibles como ocultas por sobrecrecimientos del leño (e.g. Mears 1975, Johnson 1987), (2) los cambios abruptos de crecimiento, incluyendo liberaciones y supresiones (e.g. Butler 1985, Rayback 1998), (3) las variaciones de excentricidad en el leño (e.g. Carrara 1979, Schweingruber 1996), y (4) la presencia y duración del leño de tensión por tratarse *N. pumilio* de una especie latifoliada (Schweingruber 2001). Las cicatrices a las cuales no se les logró asignar un año exacto de formación se indican con el símbolo “~” (de aproximado). Los cambios abruptos de crecimiento fueron evaluados utilizando la rutina IMPACT (Grissino-Mayer & Fritts

1997), la cual compara los crecimientos promedios antes y después de los años de perturbación. Las ventanas de tiempo utilizadas para realizar los cálculos de variaciones en el crecimiento fueron de seis años de extensión, incluyendo tres años antes del evento y dos después del mismo. Los umbrales utilizados para definir variaciones de crecimiento positivas (liberaciones) y negativas (supresiones) fueron 200 % y 30 %, respectivamente. Por otro lado, las variaciones de excentricidad, que se encuentran típicamente asociadas a la formación de leño de reacción, fueron calculadas utilizando el “índice de excentricidad” (Iex, Schweingruber 1996), con umbrales de significancia del 100 % de diferencia de crecimiento entre radios:

$$I_{ex} = \frac{\text{ancho de anillos ladera arriba}}{\text{ancho de anillos ladera abajo}}$$

El leño de tensión se identificó siguiendo los procedimientos de preparación y tinción de muestras descritos por Schweingruber & Poschlod (2005) y a través de un análisis de reflexión de la luz en secciones transversales preparadas en su superficie con un dispositivo de cuchilla de diamante (facilitado por el Institut für Waldwachstum, Universidad de Friburgo, Alemania). Esta última metodología nos permitió determinar la presencia de leño de tensión dada una reflexión diferencial de la luz entre sectores de las muestras con y sin presencia de este tipo de leño.

Con el fin de determinar el peso relativo de cada indicador dendrocronológico en la cronología final de eventos por sendero, realizamos una ponderación cuantitativa de cada indicador (Frazer 1985, Butler & Sawyer 2008, Reardon et al. 2008). Este paso es importante, ya que cada indicador aporta información de distinta calidad (o "peso") en el proceso de reconstruir la ocurrencia de las avalanchas. A las cicatrices se les otorgó un valor máximo de diez (10) puntos, las variaciones de excentricidad y la formación de leño de reacción recibieron cinco (5) puntos, mientras que los cambios abruptos de crecimiento recibieron solo tres (3) puntos, dado que este último indicador es factible de ocurrir por otro tipo de perturbaciones de ladera o por la dinámica misma del bosque (e.g. muerte de un árbol vecino). En las variaciones de excentricidad, en la formación de leño de tensión y en los cambios abruptos de crecimiento, el primer año en que se detectó la perturbación en la muestra fue considerado como el año de ocurrencia del evento. Esto se debe a que, en general, estos tres indicadores (a diferencia de las cicatrices) se producen sincrónicamente con una perturbación pero su efecto puede extenderse varios años luego de la ocurrencia de la misma.

Utilizando la cantidad ponderada de indicadores (cpi) y la profundidad de muestreo (n) en cada sendero de avalanchas, se calculó un índice de ocurrencia de eventos ( $iev = cpi \cdot n^{-1}$ ), el cual nos permitió corregir el número de evidencias de las avalanchas en función de la replicación o profundidad de muestro. Finalmente, para distinguir la ocurrencia de

eventos aislados (o muy locales) de aquellos eventos que afectaron a todo el sendero, se fijó el umbral de significancia del  $iev$  en un valor igual o mayor a  $10 \cdot n^{-1}$ . Así, años en los que  $iev \geq 10 \cdot n^{-1}$  fueron considerados años con ocurrencia de avalanchas de importante magnitud. En la Fig. 4 se indica a modo de ejemplo para uno de los senderos estudiados (LP6) la totalidad de la información dendrocronológica recuperada del examen del material leñoso y el procedimiento que se realizó posteriormente para determinar, en función del tipo de indicador y de la profundidad de muestreo, los años con ocurrencia de avalanchas.

Los  $iev$  que alcanzaron o superaron el umbral de significancia en cada sendero fueron a su vez promediados, logrando así determinar los años de mayor actividad de avalanchas a escala de ladera en Loma de las Pizarras. El programa "Análisis de Épocas Superpuestas" (Mooney & Duval 1993, Holmes & Swetnam 1994) fue implementado para validar estadísticamente la relación entre los años con mayor ocurrencia de avalanchas a escala de ladera (aquellos años en los que el promedio del  $iev \geq 1$ ) y las variaciones climáticas regionales. Los valores mensuales de precipitación y temperatura provenientes de Lago Argentino, Santa Cruz (fuente: Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina) para el periodo 1965-2004 y 1961-2004, respectivamente, fueron utilizados en la comparación. El análisis de estas variables climáticas se extendió desde mayo a octubre, siendo este el periodo en el cual la probabilidad de ocurrencia de las avalanchas de nieve en esta región de los Andes patagónicos es más alta. Durante el resto del año, las temperaturas próximas al límite superior del bosque son lo suficientemente altas como para impedir la acumulación de grandes cantidades de nieve que den origen a avalanchas. La ventana de tiempo empleada para efectuar el análisis estadístico fue de tres años, incluyendo, además del año de la avalancha, un año antes y un año después del evento. Estos valores fueron comparados con las variaciones climáticas para el registro completo empleando simulaciones de Monte Carlo, las que seleccionan al azar valores de dichas variables en ventanas de tres años, calculan sus medias y proveen los límites de confianza en base a 1.000 replicaciones.



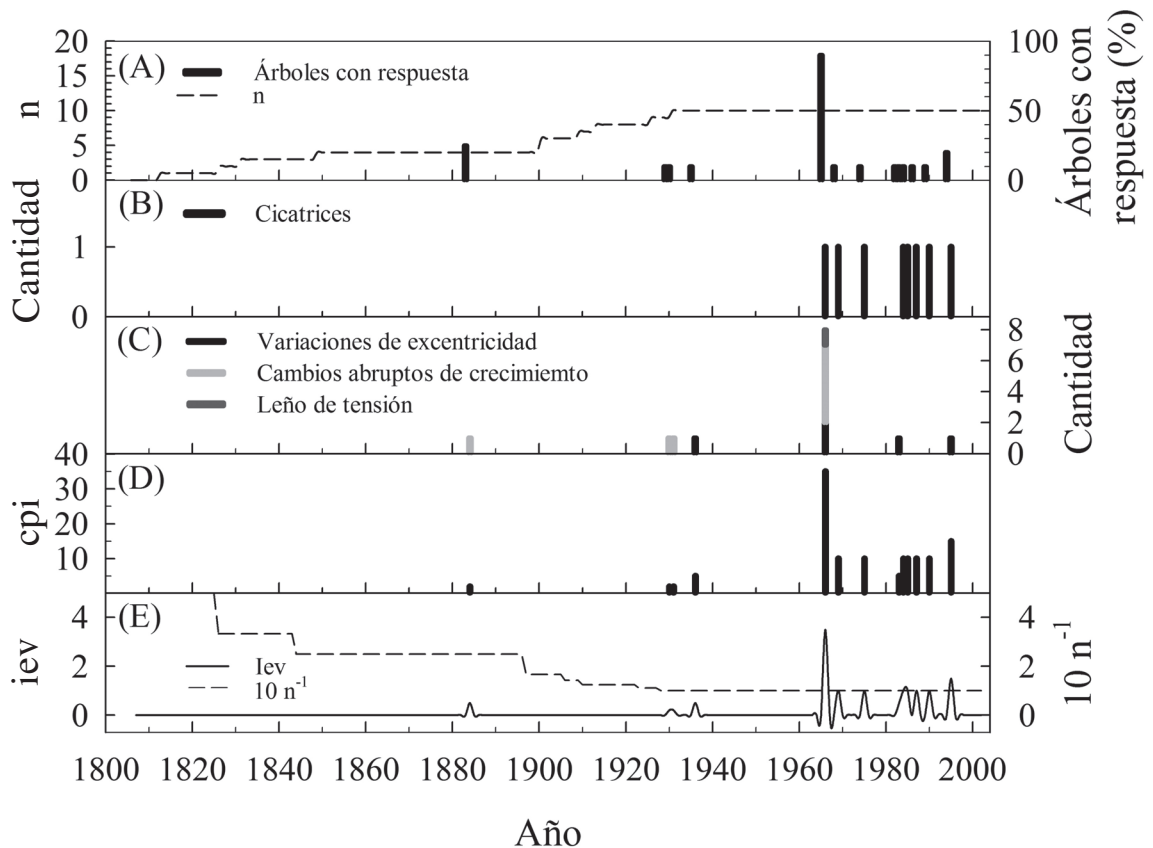


Fig. 4: (A) Profundidad de muestreo ( $n$ ) y porcentaje de árboles con algún tipo de evidencia dendrocronológica de la ocurrencia de avalanchas en el sendero LP6. (B) Cantidad de árboles con cicatrices. (C) Cantidad de árboles con variaciones de excentricidad en el leño, cambios abruptos de crecimiento y leño de tensión. (D) Cantidad ponderada de indicadores ( $cpi$ ). (E) Índice de ocurrencia de eventos ( $iev$ ) y límite de aceptación ( $10 n^{-1}$ ). Eventos de avalanchas de nieve se infieren para los años 1966 (con la señal más clara), 1969, 1975, 1984, 1985, 1987, 1990 y 1995.

(A) Sample depth ( $n$ ) and percentage of trees showing dendrochronological evidence of avalanche activity at Track LP6. (B) Number of trees with scars. (C) Number of trees with eccentricity variations, abrupt growth changes and tension wood. (D) Weighted number of avalanche tree-ring indicators ( $cpi$ ). (E) Index of avalanche occurrence ( $iev$ ) and defined threshold ( $10 n^{-1}$ ). Avalanche events are inferred for the years 1966 (with the strongest signal), 1969, 1975, 1984, 1985, 1987, 1990 and 1995.

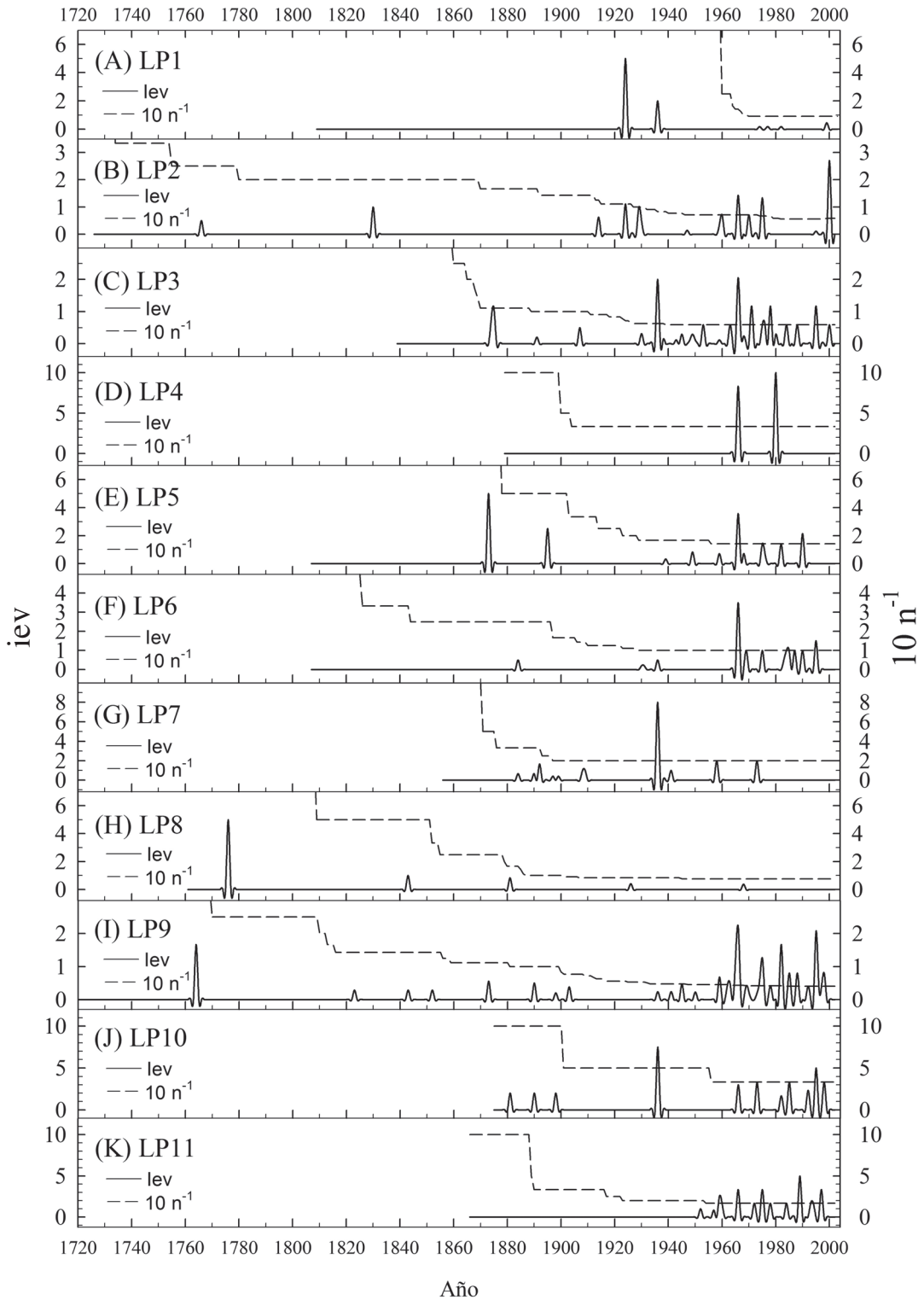
## RESULTADOS

### *Fechado dendrocronológico de las avalanchas*

#### Loma de las Pizarras 1 (LP1)

Se tomaron muestras de un total de 11 árboles (Tabla 1). Tres de estos árboles presentaron algún tipo de evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Variaciones de excentricidad en el leño fueron

documentadas en los años 1924 y 1999, mientras que los cambios abruptos de crecimiento encontrados corresponden a 1936, 1974, 1977 y 1982. No se observaron cicatrices o leño de tensión en ninguno de los árboles muestreados. Dado que el índice de ocurrencia de eventos ( $iev$ ) no alcanza en ningún caso el umbral de significancia (Fig. 5A), no pudimos datar con el material colectado en este sendero la ocurrencia de avalanchas relativamente grandes en magnitud.



*Fig. 5:* Índice de ocurrencia de eventos (iev) y límite de aceptación ( $10 \text{ n}^{-1}$ ) para los 11 senderos de avalanchas muestreados. Los años en que  $\text{iev} \geq 10 \text{ n}^{-1}$  son considerados años con actividad de avalanchas en cada sendero.

Index of avalanche occurrence (iev) and threshold ( $10 \text{ n}^{-1}$ ) for the 11 avalanche tracks sampled. The years for which  $\text{iev} \geq 10 \text{ n}^{-1}$  are considered years with avalanche activity in each track.

### Loma de las Pizarras 2 (LP2)

El sendero se muestreó en tres sectores distintos: en el canal (donde se apreciaron las perturbaciones más evidentes por avalanchas), en un sector de borde (con árboles de mayor porte que en el canal) y en un sitio de control. Se tomaron muestras de 18 árboles (Tabla 1). Doce árboles presentaron algún tipo de evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las cicatrices, presentes en los sectores del borde y del canal, fueron fechadas en los años 1924, 1929, 1960, 1966, 1970, 1975 (en dos árboles) y 2000 (en cuatro árboles). Las variaciones de excentricidad en el leño, fechadas en los tres sectores muestreados, corresponden a los años 1830, 1914, 1930, 1959 y 1966 (en dos árboles), mientras que los cambios abruptos de crecimiento, encontrados en el sector de control y en el canal, corresponden a 1766, 1947, 1995 y 2000 (en tres árboles). No se identificó leño de tensión en ningún árbol muestreado. En base a estas evidencias, eventos de avalanchas de nieve se infieren para los años 1924, 1929, 1960, 1966, 1970, 1975 y 2000 (Fig. 5B). En 1966, 1975 y 2000, el *iev* excede con distintos grados de magnitud a la línea de corte  $10 n^{-1}$ , sugiriendo para estos tres años la ocurrencia de eventos de gran magnitud en el sendero LP2.

### Loma de las Pizarras 3 (LP3)

El sendero se muestreó en sus dos bordes y en la zona de frenado de las avalanchas. Se muestrearon en total 17 árboles (Tabla 1). Trece de estos árboles presentaron algún tipo de evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las cicatrices, encontradas en árboles de ambos sectores del borde, corresponden a los años 1875, 1936, 1953, ~1963, 1966 (en tres árboles), 1971 (en dos árboles), 1975, 1976, 1978 (en dos árboles), 1984, 1988, 1995 (en dos árboles) y 2000. Las variaciones de excentricidad en el leño, encontradas en los tres sectores muestreados, corresponden a 1874, 1907, 1930, 1936 (en tres árboles), 1945, 1949, 1966, 1967, 1980, mientras que los cambios abruptos de crecimiento, encontrados también en los tres sectores de muestreo, corresponden a 1874, 1891, 1936, 1938, 1943, 1948, 1950, 1959 y 1968 (en dos árboles). Finalmente, el leño de

tensión fue identificado en un árbol del borde en 1936. Eventos de avalanchas de nieve se infieren para los años 1875, 1936, 1953, 1963, 1966, 1971, 1975, 1978, 1984, 1988, 1995 y 2000 (Fig. 5C). En 1936, 1966, 1971, 1978 y 1995, el *iev* excede con distintos grados de magnitud al umbral de significancia fijado por  $10 n^{-1}$ , lo que sugiere la ocurrencia de avalanchas de mayor magnitud en el sendero durante estos cinco años. A modo visual, una sección transversal de uno de los árboles muestreados en el sector del borde de LP3 con claras evidencias de perturbación se presenta en la Figura 6.

### Loma de las Pizarras 4 (LP4)

Tres árboles fueron muestreados en el sendero (Tabla 1). Los tres árboles presentaron evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las cicatrices fueron fechadas en 1966 (en dos árboles) y en 1980 (en los tres árboles), mientras que una variación de excentricidad en el leño se encontró para el año 1966. En ningún árbol se identificaron cambios abruptos de crecimiento o leño de tensión. Eventos de avalanchas de nieve se infieren en este sendero para los años 1966 y 1980 (Fig. 5D). En ambos años, el *iev* excede marcadamente al umbral de significancia fijado.

### Loma de las Pizarras 5 (LP5)

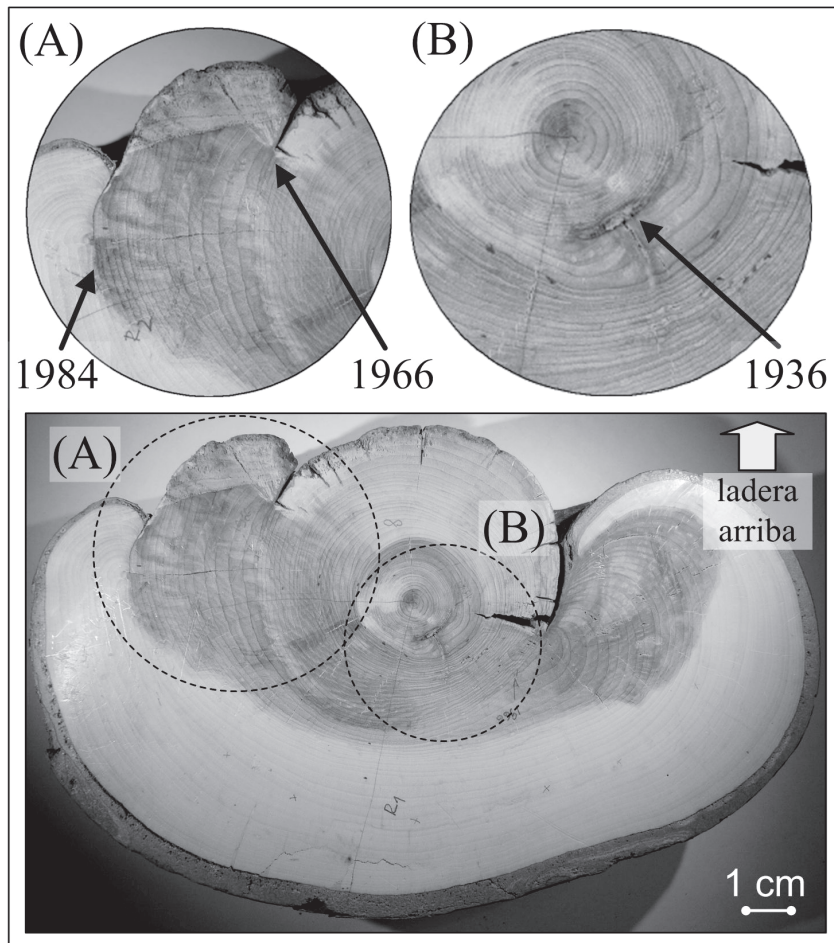
El sendero de avalanchas se muestreó en un sector del canal y en otro sector del borde. Se muestrearon en total siete árboles (Tabla 1). Cinco de estos árboles presentaron evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las cicatrices, fechadas solo en árboles del canal, corresponden a 1966, 1975, ~1982 y 1990. Las variaciones de excentricidad en el leño, fechadas tanto en árboles del canal como del borde, se encontraron en 1873, 1895, 1949, 1959, 1966 (en dos árboles), 1968, 1976 y 1990. Por su lado, los cambios abruptos de crecimiento, presentes solo en árboles del canal, se encontraron en 1939 y 1967. El leño de tensión, también presente solo en árboles del canal, se identificó en 1966 (en dos árboles). Sobre la base de los resultados obtenidos, eventos de avalanchas de nieve se infieren para los años 1966, 1975, 1982 y 1990 (Fig. 5E). En

1966 y 1990 el  $\text{iev}$  excede al umbral de significancia  $10 \text{ n}^{-1}$ ; la mayor cantidad de evidencia dendrocronológica encontrada en estos dos años (principalmente en 1966) indica eventos de mayor magnitud en el sendero.

#### Loma de las Pizarras 6 (LP6)

Se muestrearon diez árboles ubicados en sectores del canal y del borde (Tabla 1). Ocho de estos árboles presentaron evidencias de

avalanchas. Las cicatrices, presentes en árboles del canal, corresponden a 1966, 1969, 1975, 1984, ~1985, 1987, ~1990 y 1995. Las variaciones de excentricidad en el leño, fechadas en árboles de ambos sectores, se registraron en 1936, 1966 (en dos árboles), 1983 y 1995. Los cambios abruptos de crecimiento, encontrados también en ambos sectores de muestreo, corresponden a los años 1884, 1930, 1931 y 1966 (en cinco árboles). Finalmente, el leño de tensión fue observado en



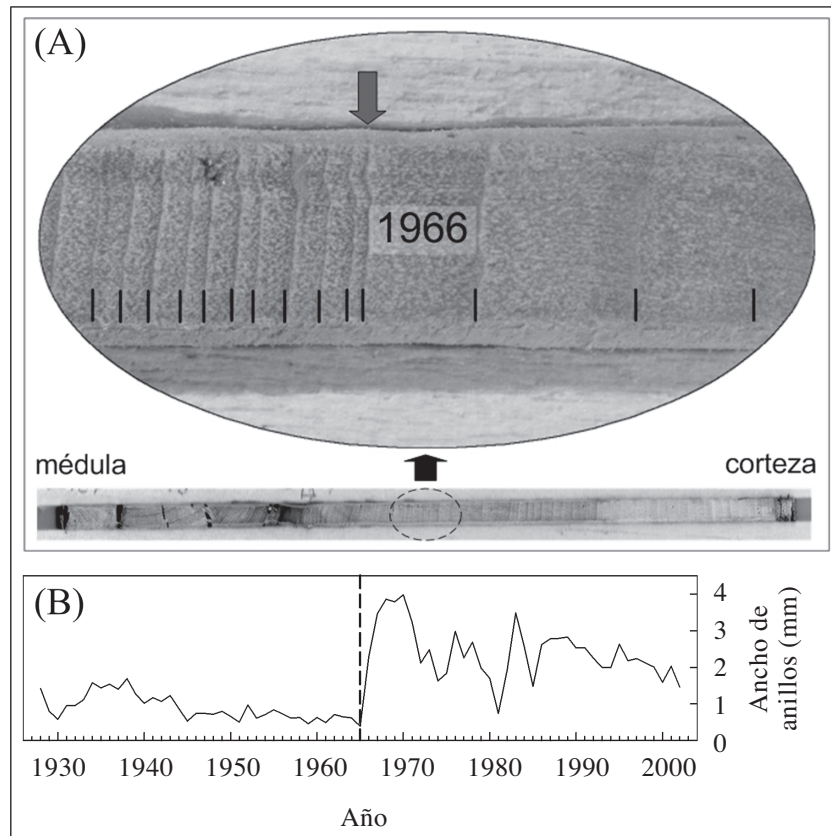
*Fig. 6:* Sección transversal de un árbol ubicado en el sector de borde del sendero LP3. En la imagen inferior se observan tres cicatrices, las cuales están ampliadas en las figuras (A) y (B). La cicatriz del año 1936 se produjo en la sección del fuste orientada ladera abajo, lo cual ocurre comúnmente cuando los árboles son inclinados por las avalanchas y dañados por árboles vecinos. La cicatriz fechada en 1966 se formó a ambos lados de la muestra, mientras que aquella fechada en 1984 solo está presente en un lado de la muestra.

Cross section from a tree located in the border sector of avalanche track LP3. Three scars can be identified in the lower image and shown with a higher magnification in figures (A) and (B). The scar formed in 1936 is down-slope oriented, which typically occurs when trees are bent by an avalanche and damaged by a neighboring tree. The scar from 1966 was formed on both sides of the sample, whereas the 1984 scar was formed only on one side of the sample.

un árbol ubicado en el sector del canal para el año 1966. Sobre la base de los resultados obtenidos, eventos de avalanchas de nieve en este sendero se infieren para los años 1966, 1969, 1975, 1984, 1985, 1987, 1990 y 1995 (Fig. 5F). En 1966 y 1995 el iev excede con distintos grados de magnitud el umbral de significancia  $10 \text{ n}^{-1}$ , lo que sugiere la ocurrencia de avalanchas de mayor magnitud, principalmente en 1966. Una muestra de barreno obtenida de un árbol ubicado en el sector canal del sendero LP6 evidencia una marcada liberación de crecimiento en 1966, como se observa en la Figura 7.

#### Loma de las Pizarras 7 (LP7)

Se muestrearon cinco árboles ubicados en sectores del canal y del borde (Tabla 1). La totalidad de las muestras obtenidas presentó evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las cicatrices, encontradas en árboles del canal y del borde, corresponden a 1936 (en dos árboles), ~1958 y 1973. Las variaciones de excentricidad en el leño, fechadas solo en árboles del canal, corresponden a 1892, 1908, 1909, 1936 (en dos árboles) y 1941. Por su lado, los cambios abruptos de crecimiento, encontrados solo en árboles del canal, se asocian



**Fig. 7:** (A) Muestra de barreno proveniente de un árbol muestreado en el sector del canal del sendero LP6. La imagen está aumentada en la porción del leño asociada al cambio abrupto de crecimiento de 1966. Las pequeñas líneas negras en la parte inferior de la muestra indican el borde entre un anillo de crecimiento y el siguiente. (B) Medición de ancho de anillos en la muestra: la perturbación de 1966 conlleva a una variación de crecimiento de 585 % (considerando una ventana de seis años en el cálculo).

(A) Core sampled from a tree growing in avalanche track LP6. The image is magnified in the sector showing the abrupt growth change starting in 1966. The short-black dashes at the base of the core correspond to the border between one tree ring and the following tree ring. (B) Tree-ring measurement of the sample: the 1966 event produced a growth change of 585 % (based on a six-year window).

a los años 1884, 1890, 1897 y 1899. El leño de tensión, encontrado también solo en árboles del canal, existió en 1936 (en dos árboles). En base a estas evidencias, eventos de avalanchas de nieve en el sendero se infieren para los años 1936, 1958 y 1973 (Fig. 5G). En 1936, el iev supera ampliamente al umbral de significancia fijado, lo que nos indica la ocurrencia de un evento de gran magnitud en el sendero para ese año en particular.

#### Loma de las Pizarras 8 (LP8)

El sendero se muestreó en el canal y en uno de sus bordes. Se muestrearon en total 13 árboles (Tabla 1). Tres de estos árboles presentaron evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las variaciones de excentricidad en el leño, presentes en ambos sectores de muestreo, corresponden a los años 1776, 1881, 1926 y 1968. Un cambio abrupto de crecimiento se registró en un árbol del borde para el año 1843. No existieron árboles con cicatrices o con leño de tensión. No es posible determinar años con ocurrencia de avalanchas de importancia en este sendero, ya que el iev no alcanza en ningún año el umbral de significancia (Fig. 5H).

#### Loma de las Pizarras 9 (LP9)

El muestreo comprendió un lóbulo lateral del sendero (indicado como canal 1), un sector central (canal 2), un sector superior (canal 3) y ambas zonas del borde (Tabla 1). De manera complementaria, un grupo de árboles de control fue muestreado en un sitio cercano. Se obtuvieron muestras de 25 árboles. De este total, 18 árboles presentaron evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las cicatrices, encontradas en ambos sectores del borde, en el canal 1, canal 2 y canal 3, corresponden a los años 1945, 1959, ~1962, 1963, 1965 (en tres árboles), 1966 (en tres árboles), 1969, 1974, 1975 (en tres árboles), 1978, 1982 (en cuatro árboles), 1985 (en dos árboles), 1988 (en dos árboles), 1992, 1995 (en cuatro árboles), 1996, 1997 y 1998 (en dos árboles). Las variaciones de excentricidad en el leño, identificadas en árboles de los seis sectores muestreados, corresponden a 1764, 1873, 1890, 1903, 1936, 1941, 1950, 1959, 1966 (en tres árboles), 1970, 1973, 1974 y 1995. Por su lado, los cambios abruptos de crecimiento,

encontrados en los sectores canal 2 y borde 2, se identificaron en 1823, 1843, 1852, 1898, 1967 y 1995. El leño de tensión, presente en árboles del canal 2 y canal 3, corresponde a los años 1966 y 1995. Sobre la base de estos resultados, eventos de avalanchas en este sendero se indican para los años 1945, 1959, 1962, 1963, 1965, 1966, 1969, 1974, 1975, 1978, 1982, 1985, 1988, 1992, 1995, 1997 y 1998 (Fig. 5I). De manera particular, en 1965, 1966, 1975, 1982 y 1995 el iev excede marcadamente a la línea de corte  $10 n^{-1}$ , lo que sugiere eventos de gran magnitud para esos años.

#### Loma de las Pizarras 10 (LP10)

Árboles ubicados solo en la zona de frenado de las avalanchas fueron muestreados, debido a que en las partes superiores del sendero la vegetación se presenta achaparrada y con individuos de corta edad. Una abundante cantidad de rodados provenientes de las partes superiores de la ladera se encontró en el sendero. Tres árboles fueron muestreados (Tabla 1), todos los cuales presentaron evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las cicatrices se encontraron para los años 1936, 1973, 1985, 1995 y 1998. Las variaciones de excentricidad en el leño fueron fechadas en 1936, 1966, 1982 y 1992, mientras que los cambios abruptos de crecimiento se encontraron en 1881, 1890, 1898, 1966 (en dos árboles) y 1992. Finalmente, el leño de tensión se detectó en un árbol en el año 1995. En base a estas evidencias, eventos de avalanchas de nieve se infieren en este sendero durante los años 1936, 1973, 1985, 1995 y 1998 (Fig. 5J). Dos son los años en que el iev excede a  $10 n^{-1}$ : 1936 y 1995, indicando para esos años eventos de gran magnitud en el sendero.

#### Loma de las Pizarras 11 (LP11)

El muestreo se realizó en un sector del canal y en otro del borde. Se muestrearon en total seis árboles (Tabla 1). En todas las muestras colectadas se encontró evidencia dendrocronológica indicativa de la ocurrencia de avalanchas. Las cicatrices, encontradas en ambos sectores de muestreo, corresponden a los años 1959, 1966, 1972, 1975 (en dos árboles), 1978, 1984, 1989 (en tres árboles), 1993, 1994 y

1997 (en dos árboles). Las variaciones de excentricidad en el leño, presentes también en árboles de ambos sectores, se indican para 1957, 1959 y 1966 (en dos árboles). Por su lado, los cambios abruptos de crecimiento, presentes solo en árboles del canal, se detectaron en 1952 y en 1960 (en dos árboles). Ningún árbol muestreado evidenció leño de tensión. Sobre la base de los resultados obtenidos, eventos de avalanchas de nieve se infieren para los años 1960, 1966, 1972, 1975, 1978, 1989, 1993, 1994 y 1997 (Fig. 5K). Particularmente, en 1960, 1966, 1975, 1989 y 1997 el *iev* excede con distintos grados de magnitud al umbral de significancia fijado, lo que sugiere para esos años en particular eventos de mayor magnitud.

#### *Análisis integral considerando todos los senderos de avalanchas*

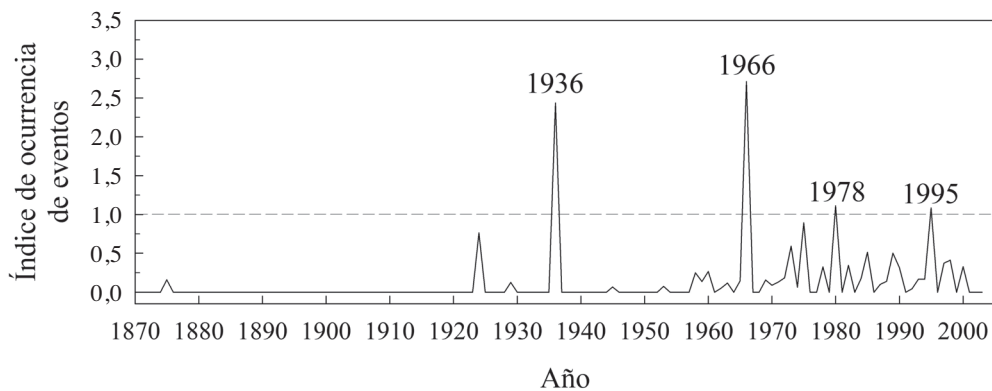
Un promedio de los índices de ocurrencia de eventos (*iev*) de los 11 senderos de avalanchas estudiados (promediando solo los valores de *iev* individuales que superan el umbral de significancia), indica que los años con mayor actividad de avalanchas a escala de ladera son 1936, 1966, 1978 y 1995 (Fig. 8); el número de senderos que registran eventos en esos años es de tres, siete, tres y cuatro, respectivamente.

#### *Clima y ocurrencia de avalanchas*

Los desvíos mensuales de las temperaturas de mayo a octubre (1961 a 2004) y las

precipitaciones totales de los tres meses con mayores precipitaciones dentro del mismo periodo (1965 a 2004 en forma continua) se muestran en la Fig. 9. En la parte superior de esta figura se indican además los años con mayor actividad de avalanchas de acuerdo con el registro dendrocronológico (1936, 1966, 1978, 1995; Fig. 8). Dado que no existen datos meteorológicos para el año 1936, sólo es posible evaluar las condiciones climáticas durante los años 1966, 1978 y 1995.

Los eventos de 1966, 1978 y en particular el de 1995, están relacionados con precipitaciones muy abundantes durante el periodo mayo a octubre (Fig. 9). Por el contrario, no se observa una clara relación entre años con avalanchas y las variaciones en las temperaturas medias mensuales. El Análisis de Épocas Superpuestas indica que la sumatoria de la precipitación ocurrida en los tres meses más nevadores de los años 1966, 1978 y 1995 es significativamente mayor, con un intervalo de confianza del 95 %, que en los años de no ocurrencia de grandes avalanchas (Fig. 10A). Para el año *t-1* (i.e. anterior a cada año de evento), los desvíos de precipitación son elevados, pero no alcanzan significancia con un nivel de confianza del 95 %. Por el contrario, el Análisis de Épocas Superpuestas señala que las variaciones de la temperatura de mayo a octubre para los años 1966, 1978 y 1995 no son estadísticamente diferentes de aquellas registradas durante los años sin o con escasos eventos de avalanchas en la ladera (Fig. 10B).



*Fig. 8:* Promedio del índice de ocurrencia de eventos (*iev*) para los 11 senderos de avalanchas, considerando para el cálculo solo los valores individuales de  $iev \geq 10 \text{ n}^{-1}$ . Los años en que el *iev* promedio supera el umbral fijado de 1,0 son 1936, 1966, 1978 y 1995.

Averaged index of avalanche occurrence (*iev*) for the 11 avalanche tracks, considering in the calculation only the single *iev* values  $\geq 10 \text{ n}^{-1}$ . The years in which the averaged *iev* exceeds the fixed threshold of 1.0 are 1936, 1966, 1978 and 1995.

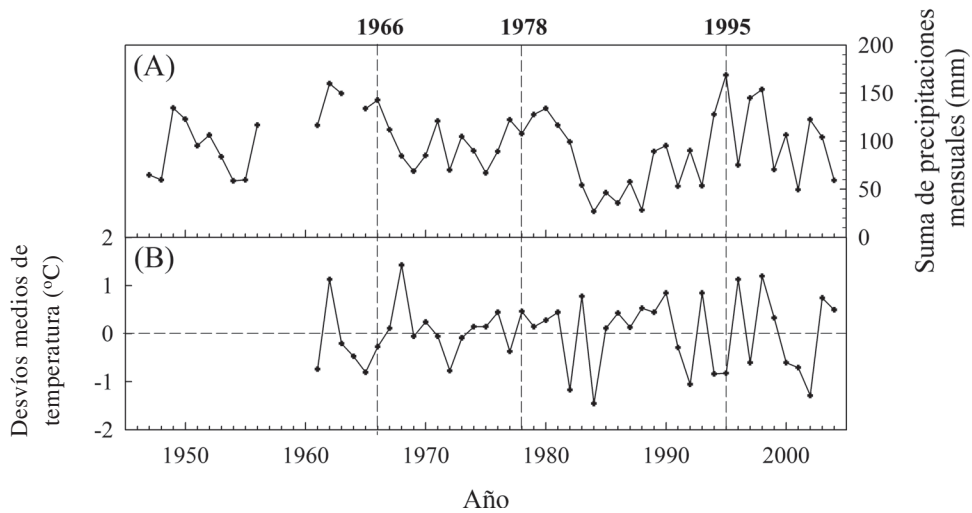


Fig. 9: (A) Sumatoria de las precipitaciones de los tres meses más nevadores dentro del periodo que va de mayo a octubre (1965 a 2004 en forma continua), y (B) desvíos medios de temperatura considerando valores mensuales de mayo a octubre (1961 a 2004). Los datos provienen de una estación meteorológica ubicada en Lago Argentino (vecina a El Calafate).

(A) Total precipitation of the three snowiest months during the period from May to October (1965 to 2004 with uninterrupted data), and (B) mean monthly temperature departures from May to October (1961 to 2004). The weather information is from the Lago Argentino (near El Calafate) meteorological station.

#### DISCUSIÓN

Este estudio constituye la primera reconstrucción dendrocronológica de múltiples eventos de avalanchas de nieve en diferentes senderos de los Andes patagónicos. De acuerdo a nuestros resultados, los años con mayor actividad de avalanchas a escala de ladera en Loma de las Pizarras, Parque Nacional Los Glaciares, son 1936, 1966, 1978 y 1995. En particular, en el año 1966 se determinó la ocurrencia de avalanchas en siete de los once senderos de avalanchas muestreados. Dos estudios previamente realizados en los Andes patagónicos lograron validar la precisión de los métodos dendrocronológicos para reconstruir en tiempo y espacio eventos documentados de avalanchas de nieve: un evento ocurrido en 1976 en Valle Martial, Tierra del Fuego (Mundo et al. 2007) y otro posterior ocurrido en 2002 en Cerro Ventana, Río Negro (Casteller et al. 2008).

En este estudio utilizamos distintos indicadores dendrocronológicos presentes en el leño de *Nothofagus pumilio* para determinar, con resolución anual, la ocurrencia de las avalanchas. Entre los indicadores empleados, las cicatrices constituyen el elemento más útil y preciso (Casteller et al. 2008). Las variaciones

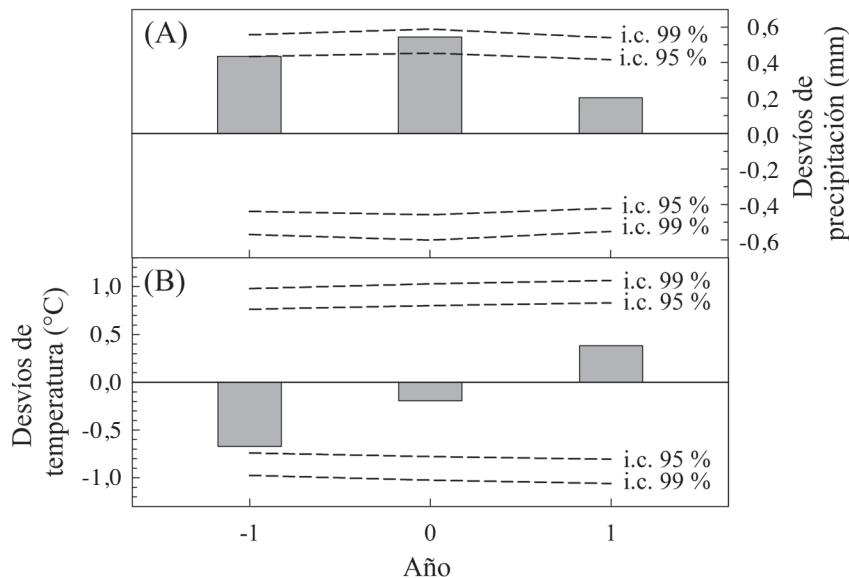
de excentricidad en el leño y la presencia de leño de tensión permitieron estimar la fecha de ocurrencia de las avalanchas, pero debido a que estos dos indicadores pueden ocurrir algunos años después de una perturbación, la asignación de un año exacto al momento en que los árboles fueron impactados presentó mayor incertidumbre que en el caso de las cicatrices. Las liberaciones y supresiones de crecimiento aportaron a su vez información a la cronología de eventos, aunque las mismas pueden ser producidas por otras perturbaciones distintas a las avalanchas o por la dinámica interna del rodal. En base a estas consideraciones, el índice de ocurrencia de eventos (iev) utilizado le atribuye a cada indicador un aporte diferencial en la construcción de la cronología final de eventos. Estudios previos han aplicado con éxito este criterio (e.g. Reardon et al. 2008), aunque utilizando principalmente especies de coníferas. Dado que las coníferas y las latifoliadas responden a los procesos geodinámicos de manera diferencial (e.g. en la localización y tipo de leño de reacción), la ponderación de los distintos indicadores aquí presentada se adaptó a la anatomía y al comportamiento específicos que presenta *N. pumilio*. En reconstrucciones históricas de procesos ambientales empleando



técnicas dendrocronológicas, las evidencias de eventos recientes son más abundantes que aquellas de eventos más antiguos. Esto es debido a que las avalanchas recientes destruyen las evidencias dejadas por aquellas ocurridas con anterioridad (Carrara 1979, Dubé et al. 2004). Por ello, para reducir la subestimación en el número de eventos reconstruidos a medida que nos alejamos del presente, establecimos un umbral de significancia para el *iev* teniendo en cuenta la profundidad de muestreo, o sea el número de muestras disponibles al momento de ocurrencia de un evento dado.

Los volteos de árboles por vientos han sido descritos como un proceso de disturbio común en los Andes patagónicos (Eskuche 1973, Veblen

et al. 1996). Rodales coetáneos de *N. pumilio* que pueden abarcar varias hectáreas en extensión son muchas veces el resultado de este proceso. La escala espacial y la forma del área afectada por el disturbio son elementos a tener en cuenta para distinguir los volteos por vientos del efecto de las avalanchas sobre la vegetación. Las áreas del bosque afectadas por las avalanchas se manifiestan como senderos angostos (i.e. raramente superan los 100 m de ancho), bien definidos y que siguen la dirección general de la pendiente. Además, las avalanchas arrastran comúnmente troncos, ramas y material rocoso de sectores superiores de la ladera hacia sus zonas de depósito. Los volteos de árboles por vientos tienen formas más caprichosas, no siempre siguen



*Fig. 10:* Resultados del Análisis de Épocas Superpuestas para los años con gran actividad de avalanchas a escala de ladera en Loma de las Pizarras: 1966, 1978 y 1995. (A) La sumatoria de la precipitación recibida en los tres meses más nevadores de esos años (durante el periodo mayo-octubre) es significativamente mayor que aquella recibida en los años sin o con escasa ocurrencia de avalanchas. La significancia estadística es estimada en base a 1000 simulaciones con segmentos de tres años seleccionados al azar a partir de los datos de precipitación (1965-2004). (B) Contrariamente, los desvíos medios mensuales de temperatura para los años 1966, 1978 y 1995 (mayo-octubre) no son estadísticamente diferentes de aquellos desvíos registrados durante los años sin o con escasos eventos de avalanchas. La significancia estadística es estimada en base a 1000 simulaciones con segmentos de tres años seleccionados al azar a partir de los datos de temperaturas (1961-2004). Las líneas punteadas indican intervalos de confianza (i.c.) de 95 % y 99 %.

Results from the Superposed Epoch Analysis for the years with high avalanche activity at a slope scale at Loma de las Pizarras: 1966, 1978 and 1995. (A) Precipitation from the three snowiest months in the period from May to October during the years 1966, 1978 and 1995 is significantly larger than in years with low or no avalanche activity. The statistical significance is estimated from a bootstrap simulation of 1000 trials of randomly selected sequences of three years from the precipitation dataset (1965-2004). (B) In contrast, mean monthly temperature departures for 1966, 1978 and 1995 (May to October) are not statistically different from those in years with low or no avalanche activity. The statistical significance is estimated from a bootstrap simulation of 1000 trials of randomly selected sequences of three years from the temperature dataset (1961-2004). The dotted lines indicate confidence levels (i.c.) of 95 % and 99 %.

la dirección de la pendiente general del terreno y los troncos de los árboles no son transportados ladera abajo como ocurre típicamente con las avalanchas. Los procesos de caídas de rocas, fenómeno observado en algunos de los senderos de Loma de las Pizarras, pueden a su vez alterar en cierta medida el registro dendrocronológico de ocurrencia de las avalanchas. Sin embargo, los impactos de las rocas afectan esporádicamente a árboles aislados, mientras que las avalanchas afectan sincrónicamente a un gran número de individuos (Stoffel et al. 2005). Es así entonces que el índice de ocurrencia de eventos permitió determinar años de ocurrencia de avalanchas solo en los casos en que la evidencia dendrocronológica de perturbación fuese lo suficientemente abundante. Estudios sobre estacionalidad en la formación de las cicatrices (Stoffel et al. 2006) y sobre posibles características anatómicas en el leño de *N. pumilio* que permitan discernir entre perturbaciones por avalanchas de aquellas por impactos de rocas (Stoffel & Hitz 2008) podrán aportar mayor información para el fechado, mapeo y diferenciación de los distintos procesos geodinámicos que ocurren en los bosques andino-patagónicos.

Si bien la ocurrencia de avalanchas de nieve en distintos senderos de una misma ladera puede no ser un proceso sincrónico (Butler 1979), la ocurrencia de un evento de gran magnitud en un sendero implica una alta probabilidad de que otros senderos de la misma ladera (o de laderas vecinas) también registren avalanchas (McClung 2003). En base a este hecho, se determinaron a nivel de ladera para Loma de las Pizarras los años con mayor actividad de avalanchas y se analizaron las variables climáticas que condicionaron su ocurrencia. Los años con mayor actividad de avalanchas se obtuvieron promediando los años de los once senderos analizados. Entre los factores climáticos más comúnmente asociados con la ocurrencia de avalanchas se han citado a la nieve diaria precipitada, la nieve precipitada en 72 horas, la dirección y velocidad del viento, y las temperaturas diarias (Schneebeili et al. 1997, Davis et al. 1999). Es importante además conocer las condiciones del manto nival a lo largo de la estación invernal, sobre todo en relación a la nieve total precipitada y al equivalente agua de la nieve (Mock 1995). Para Loma de las Pizarras y sus alrededores, la

mayoría de estas variables climáticas y nivológicas se desconocen o solo han sido registradas de manera fragmentada y/o poco sistemática. Los registros meteorológicos de Lago Argentino (El Calafate), aun cuando distantes a más de 120 km del sitio de estudio, constituyen las series de precipitación y temperatura más extensas y homogéneas para la región. Por ello, fueron estos registros los empleados para identificar las relaciones entre los años de ocurrencia de las avalanchas y las variaciones climáticas que propiciaron estos eventos (Hebertson & Jenkins 2003). De acuerdo a los resultados alcanzados con el Análisis de Épocas Superpuestas, los valores de precipitación mensual presentan significancia estadística (con un intervalo de confianza del 95 %) con los años de mayor actividad de avalanchas a escala de ladera, no existiendo dicha relación para las variables mensuales de temperatura analizadas. El haber podido disponer de valores diarios de precipitación y temperatura, tomados con mayor cercanía al área de estudio y complementados con información sobre insolación, dirección y velocidad del viento y radiación neta, hubiese permitido determinar las situaciones particulares de la atmósfera y del manto nival que dieron lugar a la ocurrencia de las avalanchas (Björnsson 1980, Hächler 1987). Sin embargo, el registro dendrocronológico en la reconstrucción de avalanchas tiene una resolución anual (Stoffel & Bollschweiler 2008); por ello, en caso de ocurrir sucesivos eventos en un mismo sendero de avalanchas durante un mismo año, no sería posible hacer una vinculación entre cada evento individual con resolución diaria y el registro dendrocronológico con resolución anual.

La información dendrocronológica presentada en este trabajo será empleada en trabajos futuros de calibración de los coeficientes utilizados por distintos modelos numéricos de simulación de avalanchas (Casteller et al. 2008), tanto para distintas condiciones de nieve como de terreno a lo largo de los Andes. Como aplicación directa y práctica de estas simulaciones se espera que en un futuro próximo podamos contar con cartas de riesgo regionales de avalanchas, una herramienta de gran importancia para realizar un planeamiento territorial seguro en zonas montañosas con riesgo de ocurrencia de avalanchas (Gruber & Margreth 2001).

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es el resultado del trabajo de muchas personas. Los muestreos a campo fueron posibles gracias a la colaboración de José Hernández y Mariano Morales. Agradecemos a la Administración de Parques Nacionales, con sede en la localidad de El Chaltén, por los datos provistos y por la asistencia en la logística de las campañas. Esta investigación fue financiada por la Agencia Nacional del Promoción Científica y Tecnológica (PICTR02-186), el Instituto para la Investigación de la Nieve y las Avalanchas (SLF) y por los proyectos CRN03 y CRN2047 del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI). El último de estos proyectos fue financiado por el subsidio CRN II # 2060, el cual es respaldado por la US National Science Foundation (subsidio GEO-0452325). Las secciones del texto en inglés fueron revisadas por Erin Gleeson. Agradecemos a los dos revisores anónimos de este trabajo, quienes con sus valiosas contribuciones permitieron la elaboración de un manuscrito mejorado y más claro. Finalmente, agradecemos por su trabajo al Editor Asociado de la Revista Chilena de Historia Natural, Dr. Claudio Latorre Hidalgo.

## LITERATURA CITADA

- BEBI P, A CASTELLER, AC MAYER & V STÖCKLI (2004) Jahrringe als Indikatoren für extreme standortsbedingungen im Gebirge: Schnee, Lawinen, und Permafrost. *Swiss Forestry Journal* (Suiza) 155: 208-212.
- BJÖRNSSON H (1980) Avalanche activity in Iceland, climatic conditions, and terrain features. *Journal of Glaciology* 26: 13-23.
- BOLLSCHWEILER M, M STOFFEL, M EHMISCH & M MONBARON (2007) Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods. *Geomorphology* 87: 337-351.
- BURROWS CJ & VL BURROWS (1976) Procedures for the study of snow avalanche chronology using growth layers (annual rings) of woody plants. *Institute of Arctic and Alpine Research Occasional Paper No. 23*. 54 pp.
- BUTLER DR (1979) Snow avalanche path terrain and vegetation, Glacier National Park, Montana. *Arctic and Alpine Research* 11: 17-32.
- BUTLER DR (1985) Vegetational and geomorphic change on snow avalanche paths, Glacier National Park, Montana, USA. *Great Basin Naturalist* 45: 313-317.
- BUTLER DR & C SAWYER (2008) Review and comparison of the different methods used for dating high-magnitude snow avalanches. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 303-309.
- BUTLER DR, JG OELFKE & LA OELFKE (1986) Historic rockfall avalanches, northeastern Glacier National Park, Montana, USA. *Mountain Research and Development* 6: 261-271.
- CARRARA PE (1979) The determination of snow avalanche frequency through tree-ring analysis and historical records at Ophir, Colorado. *Geological Society of America Bulletin* 90: 773-780.
- CASTELLER A, V STÖCKLI, R VILLALBA & AC MAYER (2007) An evaluation of dendroecological indicators of snow avalanches in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 39: 218-228.
- CASTELLER A, M CHRISTEN, R VILLALBA, H MARTÍNEZ, V STÖCKLI, JC LEIVA & P BARTELT (2008) Validating numerical simulations of snow avalanches using dendrochronology: the Cerro Ventana event in Northern Patagonia, Argentina. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 433-443.
- COOK ER (1985) A time series analysis approach to tree-ring standardization. Tesis doctoral, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA. 171 pp.
- DAVIS RE, K ELDER, D HOWLETT & E BOUZAGLOU (1999) Relating storm and weather factors to dry slab avalanche activity at Alta, Utah, and Mammoth Mountain, California, using classification and regression trees. *Cold Regions Science and Technology* 30: 79-89.
- DIMITRI MJ (1972) La región de los bosques andino-patagónicos. Colección Científica del INTA, Buenos Aires, Argentina. 381 pp.
- DUBE S, L FILION & B HETU (2004) Tree-Ring Reconstruction of High-Magnitude Snow Avalanches in the Northern Gaspé Peninsula, Québec, Canada. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 36: 555-564.
- ESKUCHE U (1973) Estudios fitosociológicos en el norte de la Patagonia. Investigación de algunos factores de ambientes en comunidades de bosque y chaparral. *Phytocoenologia* 1: 64-113.
- FRAZER GW (1985) Dendrogeomorphic evaluation of snow avalanche history at two sites in Banff National Park. Tesis de Master, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada. 241 pp.
- FRITTS HC (1976) Tree rings and climate. Academic Press, London, United Kingdom. 567 pp.
- GERS E, N FLORIN, H GÄRTNER, T GLADE, R DIKAU & FH SCHWEINGRUBER (2001) Application of shrubs for dendrogeomorphological analysis to reconstruct spatial and temporal landslide movement patterns -A preliminary study-. En: Dikau R & KH Schmidt (eds) *Mass Movements in South, West and Central Germany*. *Zeitschrift für Geomorphologie* 125: 163-175.
- GRISSINO-MAYER HD & HC FRITTS (1997) The International Tree-Ring Data Bank: an enhanced global database serving the global scientific community. *Holocene* 7: 235-238.
- GRUBER U & S MARGRETH (2001) Winter 1999: A valuable test of the avalanche-hazard mapping procedure in Switzerland. *Annals of Glaciology* 32: 328-332.
- HÄCHLER P (1987) Analysis of the weather situations leading to severe and extraordinary avalanche situations. *Proceedings of the Davos Symposium Avalanche Formation, Movement and Effects* (Suiza). IAHS Publication No. 162: 295-304.
- HEBERTSON EG & MJ JENKINS (2003) Historic climate factors associated with major avalanche years on the Wasatch Plateau, Utah. *Cold Regions Science and Technology* 37: 315-332.
- HOLMES RL (1983) Computer-assisted quality control in

- tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-75.
- HOLMES RL & TW SWETNAM (1994) Program EVENT users manual: superposed epoch analysis in fire history. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA. URL: <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm/>
- HUPP CR (1984) Dendrogeomorphic Evidence of Debris flow frequency and magnitude at Mount Shasta, California. *Environmental Geology and Water Sciences* 6: 121-128.
- JOHNSON EA (1987) The relative importance of snow avalanche disturbance and thinning on canopy plant-populations. *Ecology* 68: 43-53.
- LAROCQUE SJ, B HETU & L FILION (2001) Geomorphic and dendroecological impacts of slushflows in Central Gaspé peninsula (Quebec, Canada). *Geografiska Annaler A-Physical Geography* 83: 191-201.
- LEIVA JC & H MARTÍNEZ (1998) Estudio de las presiones y velocidades de impacto de la nieve sobre cobertizos en la Ruta Nacional N° 7. Informe técnico. Mendoza, Argentina. 46 pp.
- LEIVA JC & H MARTÍNEZ (2006) Estudio geocientífico aplicado al ordenamiento territorial de Puente del Inca. Anexo II, Servicio Geológico Minero Argentino. Mendoza, Argentina. 5 pp.
- MCCLUNG DM (2003) Magnitude and frequency of avalanches in relation to terrain and forest cover. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 35: 82-90.
- MEARS AI (1975) Dynamics of dense snow avalanches interpreted from broken trees. *Geology* 3: 521-523.
- MOCK CJ (1995) Avalanche climatology of the continental zone in the southern Rocky-Mountains. *Physical Geography* 16: 165-187.
- MOONEY CZ & RD DUVAL (1993) Bootstrapping: a nonparametric approach to statistical inference. Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences 95. Newbury Park, California, USA. 73 pp.
- MUNDO IA, MD BARRERA & FA ROIG (2007) Testing the utility of *Nothofagus pumilio* for dating a snow avalanche in Tierra del Fuego, Argentina. *Dendrochronologia* 25: 19-28.
- NYBERG R (1985) Debris flows and slush avalanches in northern Swedish Lappland. Distribution and geomorphological significance. Tesis doctoral, University of Lund, Sweden. 222 pp.
- POTTER N (1969) Tree ring dating of snow avalanche tracks and the geomorphic activity of avalanches, Northern Absaroka Mountains, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin* 123: 141-165.
- RAYBACK SA (1998) A dendrogeomorphological analysis of snow avalanches in the Colorado Front Range, USA. *Physical Geography* 19: 502-515.
- REARDON BA, GT PEDERSON, CJ CARUSO & DB FAGRE (2008) Spatial reconstructions and comparisons of historic snow avalanche frequency and extent using tree rings in Glacier National Park, Montana, USA. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 40: 148-160.
- RINN F (1996) Time series analysis and presentation. Version 3.0 reference manual. 262 pp.
- SCHNEEBELI M, M LATERNSENER & W AMMANN (1997) Destructive snow avalanches and climate change in the Swiss Alps. *Eclogae Geologicae Helveticae* 90: 457-461.
- SCHULMAN E (1956) *Dendroclimatic change in Semiarid America*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA. 142 pp.
- SCHWEINGRUBER FH (1996) *Tree rings and environment dendroecology*. Paul Haupt Verlag, Bern. 609 pp.
- SCHWEINGRUBER FH (2001) *Dendroökologische holzanatomie: Anatomische Grundlagen der dendrochronologie*. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Suiza. Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien. 472 pp.
- SCHWEINGRUBER FH & P POSCHLOD (2005) Growth rings in herbs and shrubs: Life span, age determination and stem anatomy. *Forest Snow and Landscape Research* 79: 195-415.
- SHRODER JF (1978) Dendro-geomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research* 9: 168-185.
- SHRODER JF (1980) Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4: 161-188.
- SMITH L (1973) Indication of snow avalanche periodicity through interpretation of vegetation patterns in the North Cascades, Washington. En: *Methods of avalanche control on Washington mountain Highways- Third Annual Report*, Washington State Highway Commission Department of Highways, Olympia, Washington, USA. 187 pp.
- STOFFEL M & M BOLLSCHWEILER (2008) Tree-ring analysis in natural hazards research - an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8: 187-202.
- STOFFEL M & OM HITZ (2008) Rockfall and snow avalanche impacts leave different anatomical signatures in tree rings of juvenile *Larix decidua*. *Tree Physiology* 28: 1713-1720.
- STOFFEL M, D SCHNEUWLY, M BOLLSCHWEILER, L LIÈVRE, R DELALOYE, M MYINT & M MONBARON (2005) Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest - a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 68: 224-241.
- STOFFEL M, M BOLLSCHWEILER & GR HASSLER (2006) Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity - a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 1424-1437.
- STOKES MA & TL SMILEY (1968) *An introduction to tree ring dating*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA. 73 pp.
- VEBLEN TT, C DONOSO, T KITZBERGER & AJ REBERTUS (1996) Ecology of Southern Chilean and Argentinean *Nothofagus* forests. En: Veblen TT, RS Hill & J Read (eds) *The ecology and biogeography of Nothofagus forests*. Yale University Press, New Haven: 293-353.
- WEIR P (2002) *Snow avalanche management in forested terrain*. Research Branch, British Columbia Ministry of Forests, Victoria, British Columbia, Canada. Land Management. Handbook No. 55. 207 pp.
- WILES GC, PE CALKIN & GC JACOBY (1996) *Tree-ring analysis and quaternary geology: Principles and recent applications*. *Geomorphology* 16: 259-272.
- ZANETTINI JCM, MJ MARQUEZ & RA GONZÁLEZ (1999) Mapa de recursos minerales del área fronteriza argentino-chilena entre los 34 y 56° S (escala 1:1000000). Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino.