



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

**Relaciones entre el crecimiento de *Nothofagus betuloides*
y el clima local y de gran escala en bosques subantárticos
de la Isla Navarino**

Patrocinante: Sr. Duncan Christie B.

Trabajo de Titulación presentado como
parte de los requisitos para optar al Título de
Ingeniero Forestal.

JUAN CARLOS LLANCABURE JARA

VALDIVIA

2011

Calificación del Comité de Titulación

	Nota
Patrocinante: Sr. Duncan Christie B.	7,0
Informante: Sr. Antonio Lara A.	6,5
Informante: Sr. Juan C. Aravena D.	7,0

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Duncan Christie B.

AGRADECIMIENTOS

En este primer párrafo quiero agradecer a las personas más importantes en mi vida y por las cuales soy quién soy. A mis padres Félix y Lorenza los cuales siempre han confiado en mí y cada día me entregan su infinito amor y cariño. A mi hermana Nancy, quién es y será mi segunda madre, gracias por tanto amor. Al amor de toda la vida Andrea, gracias por creer y confiar tanto en mí. A mi pequeño retoño Martín, aunque viene en camino, gracias por hacerme inmensamente feliz.

Quiero agradecer a muchas personas que de una u otra manera han sido parte de esta etapa como estudiante y que culmina con este trabajo. A mis amigos Emilio Cuq y Claudio Alvares, por los buenos momentos vividos en el Laboratorio y algún asado por ahí, además por su disposición a entregarme sus conocimientos en dendrocronología. Un agradecimiento especial a mi gran amigo Jorge Silva, por sus grandes consejos y por estar conmigo en todo momento. Además quiero agradecer a mis profesores informantes Antonio Lara y Juan Carlos Aravena por sus sabios consejos y respectivas correcciones y porque amablemente forman parte de mi comisión evaluadora. En especial quiero agradecer a mi profesor Patrocinante Duncan Christie por toda su enseñanza y disponibilidad para responder cada una de mis dudas en las extensas reuniones y por incentivar me a continuar trabajando en futuros estudios.

Finalmente agradecer a la Fundación Omora y a los Proyectos FONDECYT PDA-24 y FONDECYT 1090479, los cuales fueron un aporte importante en el desarrollo de este estudio.

	Índice de materias	Página
	Resumen	
1	INTRODUCCIÓN	1
2	ESTADO DEL ARTE	3
3	MÉTODOS	6
3.1	Área de estudio	6
3.2	Desarrollo de la cronología	8
3.2.1	Colecta de las muestras en terreno	8
3.2.2	Procesamiento y cofechado de las muestras	8
3.3	Construcción de la cronología	9
3.4	Relación con variables climáticas	10
3.4.1	Relación entre el clima local y la Oscilación Antártica (AAO)	10
3.4.2	Relación entre el crecimiento radial de <i>Nothofagus betuloides</i> y el clima local y de gran escala	11
4	RESULTADOS	12
4.1	Relación entre la Oscilación Antártica (AAO) y el clima local	12
4.2	Cronología de ancho de anillos	13
4.3	Relación entre el crecimiento de <i>Nothofagus betuloides</i> y el clima local y de gran escala	16
5	DISCUSIÓN	20
5.1	Cronología de ancho de anillos	20
5.2	Relación de la AAO y el clima local	21
5.3	Relación entre anillos y el clima	21
6	CONCLUSIONES	23
7	REFERENCIAS	24
Anexos	1 Ubicación del sitio de muestreo en Lago Robalo, Isla Navarino	
	2 Valores de R-Bar y número de muestras para la cronología de <i>N. betuloides</i> en sus versiones estándar y residual	
	3 Funciones de correlación entre la cronología de <i>N. betuloides</i> y la temperatura de las estaciones utilizadas en el análisis	
	4 Funciones de correlación entre la cronología de <i>N. betuloides</i> y la precipitación total anual de las estaciones utilizadas en los análisis	

RESUMEN

Se desarrolló una cronología de ancho de anillos de *N. betuloides* a partir de las muestras colectadas en el sitio Lago Róbalo ubicado a los 54°58' de latitud Sur y 67°41' de longitud Oeste, en la Isla Navarino, región de Magallanes y la Antártica Chilena, con el objetivo de analizar la relación de los anillos de crecimiento con las variables climáticas locales (precipitación y temperatura) y la oscilación antártica (AAO). Además de evaluar el potencial de la especie para realizar reconstrucciones climáticas y evaluar el potencial de utilizar material subfósil para robustecer temporalmente la cronología de ancho de anillos.

Nothofagus betuloides es una de las especies, del género *Nothofagus*, más longevas de los bosques sudamericanos pudiendo alcanzar más de 600 años. Se distribuye desde Valdivia (40°15'S) hasta Cabo de Hornos (56°30'S), encontrándose en ambas cordilleras, en alturas que varían entre los 800 a 1000 m en su área de distribución norte, hasta el nivel del mar en el extremo sur.

Las muestras fueron procesadas siguiendo las técnicas dendrocronológicas descritas por Stokes and Smiley (1968). La calidad del fechado fue verificada a través del programa COFECHA. La cronología fue elaborada a través del programa ARSTAN, ajustando cada una de las series a una curva exponencial negativa o en su defecto una regresión lineal o línea horizontal.

La longitud de la cronología alcanzó a los 513 años, siendo la más extensa y mayormente replicada, desarrollada tanto para la especie como para el género *Nothofagus*.

La cronología arrojó estadígrafos similares de correlación entre las series y sensibilidad media a los obtenidos para las demás cronologías desarrolladas en la Patagonia Chilena y Argentina.

La comparación de los registros de los índices de ancho de anillos con los datos de del clima local y la AAO indican que en los bosques de la isla Navarino, *N. betuloides* muestra una respuesta negativa significativa con la temperatura de invierno y mediados de primavera (junio a octubre) de la estación de crecimiento actual. Algo similar ocurre con la AAO presentando una marcada correlación negativa para casi la totalidad de los meses analizados. En contraposición la precipitación muestra una relación débil con el crecimiento de *N.betuloides*.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que *N. betuloides* es una especie que refleja las señales climáticas, por lo tanto presenta un gran potencial para realizar reconstrucciones del clima para los últimos siglos en la Patagonia Austral.

Palabras claves: *Nothofagus betuloides*, Navarino, Cronología, Oscilación Antártica (AAO).

1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática es uno de los factores claves que influyen sobre la dinámica de poblaciones. El rol del clima sobre la dinámica de especies arbóreas puede ocurrir directamente a través del efecto de la temperatura y precipitación sobre el crecimiento, reclutamiento y mortalidad (Körner, 1998; Pederson, 1998; Lloyd y Fastie 2002; Villalba *et al.* 2005), y/o indirectamente a través de perturbaciones moduladas por el clima (Gray, 2008). Actualmente uno de los mayores desafíos en ecología es identificar y cuantificar el rol de la influencia del clima regional y de gran escala sobre la dinámica de especies a lo largo de gradientes ambientales (Peterson y Peterson 2001, Villalba *et al.* 2005, Parmesan 2006). Este conocimiento es clave para determinar como los actuales patrones de distribución han sido afectados por variaciones climáticas pasadas, y cuáles pueden ser los potenciales cambios en la dinámica y rangos de distribución debido a cambios en el clima.

Los bosques templados del sur de Sudamérica abarcan un amplio rango de distribución latitudinal entre los 35°S y 55°S, extendiéndose por la vertiente occidental de los Andes chilenos y en algunos sectores Andinos de Argentina que colindan con la estepa Patagónica (Armesto *et al.* 1996). La estructura y distribución actual de estos ecosistemas son producto de las transformaciones en el paisaje ocurridas durante las glaciaciones del cuaternario, y la presencia de la corriente de Humboldt (Villagrán *et al.* 1996). Estos bosques constituyen una isla biogeográfica, ya que se encuentran aislados geográficamente de otras formaciones de bosque lluvioso. En estos ecosistemas la temperatura es el principal factor limitante sobre el crecimiento arbóreo, por lo que cambios en los patrones de temperaturas podrían ejercer severos efectos sobre su dinámica. Actualmente los patrones de circulación atmosférica son anómalos, dentro del contexto del registro instrumental, y el actual incremento de la temperatura no tiene precedentes en los últimos 400 años (Aravena *et al.*, 2002; Villalba *et al.* 2003). Dado que la respuesta de las especies arbóreas a cambios en el clima sería mayor en poblaciones ubicadas en sus márgenes de distribución (Iverson *et al.* 2004, Hampe y Petit, 2005), es justamente en los bosques templados de la Patagonia austral donde los efectos serían más rápidos y severos.

Hoy en día el estudio de la respuesta de los ecosistemas boscosos de la Patagonia austral a las variaciones en el clima local y la circulación atmosférica a una escala de tiempo secular, emerge como un tópico de investigación clave ya que representan los bosques más australes del planeta. Para este fin los anillos de crecimiento de los árboles proveen una excelente aproximación metodológica, ya que constituyen archivos naturales que registran con una resolución anual las relaciones entre el

crecimiento y la variabilidad climática, y al mismo tiempo pueden ser utilizados como indicadores de cambios climáticos.

Bajo este contexto, el objetivo principal del presente trabajo es determinar la relación del crecimiento radial de *N. betuloides* en el extremo sur de Chile con la variabilidad climática local (precipitación y temperatura) y de gran escala (AAO). Para el cumplimiento del objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar una cronología de ancho de anillos de *N. betuloides* para el sitio Lago Róbalo en la Isla Navarino.

- Evaluar el potencial de utilizar material subfósil de *N. betuloides* para extender temporalmente cronologías de ancho de anillos.

- Evaluar el potencial de *N. betuloides* para realizar reconstrucciones paleoclimáticas en el extremo sur de Chile.

La respuesta a estos objetivos, a una escala de tiempo centenal, es de importancia clave para lograr contextualizar la dinámica de crecimiento actual de estos bosques bajo una perspectiva de largo plazo.

2. ESTADO DEL ARTE

El clima de la tierra no ha sido constante a lo largo del tiempo, sino que ha presentado fluctuaciones debido a distintas causas naturales como lo son las erupciones volcánicas, cambios en la órbita de traslación de la Tierra, cambios en el ángulo del eje de rotación y las variaciones en la composición atmosférica. Actualmente el planeta se encuentra en un escenario de calentamiento global con un aumento de la temperatura global entre 0,3 y 0,6° C durante el último siglo (IPCC, 2007). En el extremo sur de América estas variaciones climáticas también se han registrado, principalmente en la Patagonia Chilena y Argentina (45-55° S), donde los registros de las estaciones meteorológicas, muestran un aumento de las temperaturas en las últimas décadas (Rosenblüth *et al.* 1997).

Villalba *et al.* (2003) a través de los registros de estaciones meteorológicas entre los 36° y 55° S en Chile y Argentina, determinan un período de disminución de las temperaturas de verano para Puerto Montt, especialmente para el intervalo 1945-1975 y entre 1950 y 1975 para Bariloche, ubicado a la misma latitud, pero al lado este de Los Andes. Dicho período también fue mostrado por Rosenblüth *et al.* (1997) para Valdivia (39,8 ° S) y Temuco (38,5 ° S). En el mismo estudio de Villalba *et al.* (2003), muestra para mayores latitudes en la Patagonia Austral de Chile y Argentina, una tendencia al calentamiento en la estación de verano, registrado para las costas del Pacífico y el Atlántico, el cual se ve mayormente reflejado en Río Gallegos con un aumento de 2,5°C en las temperaturas desde 1931 hasta 1990.

Además de los estudios del clima pasado y actual sobre altas latitudes de América del Sur, se realizaron estimaciones de escenarios climáticos para diferentes regiones de Chile durante el siglo XXI, principalmente para los periodos entre 2071 y 2100. Estas proyecciones se efectuaron para dos escenarios. Uno con emisiones severas de CO₂ (A2) y otro con emisiones moderadas (B2). Estas estimaciones muestran una clara tendencia en el aumento de las temperaturas en todas las regiones para ambos escenarios, siendo mayores para A2, el cual varía entre 2° y 4° C, mayormente reflejado en las regiones andinas y disminuyendo de norte a sur, alcanzando valores por sobre los 5° C en algunos sectores de gran altitud de la Cordillera de Los Andes, principalmente en la estación de verano. Solo en la región austral pequeños sectores presentarían variaciones en la temperatura menores a 1° C bajo el escenario B2. En lo correspondiente a las precipitaciones se presentan diferencias entre las laderas occidentales y orientales de Los Andes, principalmente, durante las estaciones de verano y otoño en las latitudes medias, con una disminución de las precipitaciones de un 50% e incluso un 75% en algunas áreas del centro-sur de Chile, bajo el escenario A2 (CONAMA, 2006).

En el Hemisferio sur existe un patrón dominante en las anomalías de circulación atmosférica de carácter no estacional, denominado Oscilación Antártica (AAO) el cual se presenta al sur de los 20° S, y se caracteriza por anomalías de presión atmosférica de signo contrario sobre el continente antártico y a lo largo de una banda centrada en 40°-50° S, el cual influye directamente sobre los regímenes de temperatura y precipitaciones. Esta anomalía presenta una marcada tendencia positiva en los últimos 50 años (Garreaud *et al.* 2009).

No sólo a través de los registros meteorológicos se puede determinar las variaciones en el clima durante el pasado, sino que también a través de registros indirectos. Uno de estos corresponde a las reconstrucciones paleoclimáticas desarrolladas a partir de cronologías de ancho de anillos de árboles. Esta ciencia es conocida como Dendroclimatología, la cual está inserta en una disciplina más general llamada dendrocronología. La palabra Dendrocronología proviene del griego: dendros = árbol, cronos = tiempo y logos = conocimiento. La dendrocronología es el estudio de la edad de las especies arbóreas y arbustivas leñosas asignándoles fechas de acontecimientos de particular interés en el tiempo (Fritts, 1976).

Las primeras aproximaciones en el desarrollo de cronologías de ancho de anillo en Sudamérica, datan de 1949 año en que Edmund Schuman realiza la primera expedición a terreno en Argentina y Chile desarrollando una cronología preliminar de *Austrocedrus chilensis* con solo cuatro ejemplares. Después de 25 años, LaMarche desarrolla el primer set de cronologías para América del sur a partir de árboles de *Araucaria araucana* y *Austrocedrus chilensis*. En los últimos 40 años el número de cronologías de ancho de anillos ha aumentado exponencialmente en Los Andes, desde las zonas subtropicales a los ambientes subantárticos del extremo sur de América, con más de 300 cronologías de anillos de árboles para Chile y Argentina (Boninsegna *et al.* 2009).

Estudios realizados en altas latitudes de Sudamérica, recopilados por D'Arrigo y Villalba (2000) muestran que los registros de anillos de árboles reflejan los cambios de la temperatura a escala regional para esta zona y además que la temperatura superficial del mar se correlaciona positivamente con las cronologías de ancho de anillos.

Aravena, *et al.* (2002) a través de 21 cronologías de *Nothofagus pumilio*, mostraron que esta especie, en la Patagonia Austral (50 a 55°30'S), se correlaciona positivamente con las temperaturas en los sitios más occidentales y que a medida que se situaban hacia el este, en las zonas semiáridas hacia el límite con la estepa patagónica, estos sitios se correlacionan positivamente con las precipitaciones. Además, diez de las 21 cronologías de *N. pumilio*, mostraron una tendencia al incremento por sobre la media a partir de 1960 hasta 1996.

De las especies arbóreas que habitan los bosques más australes del planeta, *N. betuloides* ha sido la menos utilizada en estudios dendrocronológicos. Uno de los pocos estudios fue realizado por Szeicz (1997), quien desarrolló dos cronologías de *N. betuloides* en las zonas costeras de la Región de Aysén (45 - 46° S) demostrando que esta especie presenta una correlación positiva entre el crecimiento y las temperaturas de principios de verano (diciembre-enero) y una correlación negativa con las precipitaciones para los meses de noviembre, diciembre y enero de la estación de crecimiento actual.

Nothofagus betuloides es una de las especies del género *Nothofagus* más longevas de los bosques sudamericanos. Según Veblen *et al.* (1996) puede alcanzar edades entre 500 a 600 años, pero a su vez Gutiérrez *et al.* (1991) afirman que *N. betuloides* puede alcanzar los 628 años de edad.

Nothofagus betuloides es un árbol siempreverde endémico de los bosques costeros templados lluviosos de Chile y Argentina o bosques subantárticos. Puede alcanzar dimensiones de 30 m de altura y hasta los 2 m de diámetro en Magallanes y Tierra del Fuego. Se distribuye desde Valdivia (40°15'S) hasta Cabo de Hornos (56°30'S), encontrándose en ambas cordilleras, en altitudes que varían entre los 800 a 1000 m en su área de distribución norte hasta el nivel del mar en el extremo sur. En esta zona crece en suelos desarrollados principalmente sobre sustratos glaciales y fluvioglaciales a demás de depósitos marinos y material volcánico (Donoso, 2006).

3. MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la Isla Navarino, comuna de Cabo de Hornos, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

El sitio de estudio se ubicó en el Cerro Róbalo ubicado aproximadamente a 6,5 km de la ciudad de Puerto Williams. El sitio de muestreo está ubicado a los 54°58' S y 67°41' O, a 297 m s.n.m y con exposición SE (Figura 1 y anexo 1).

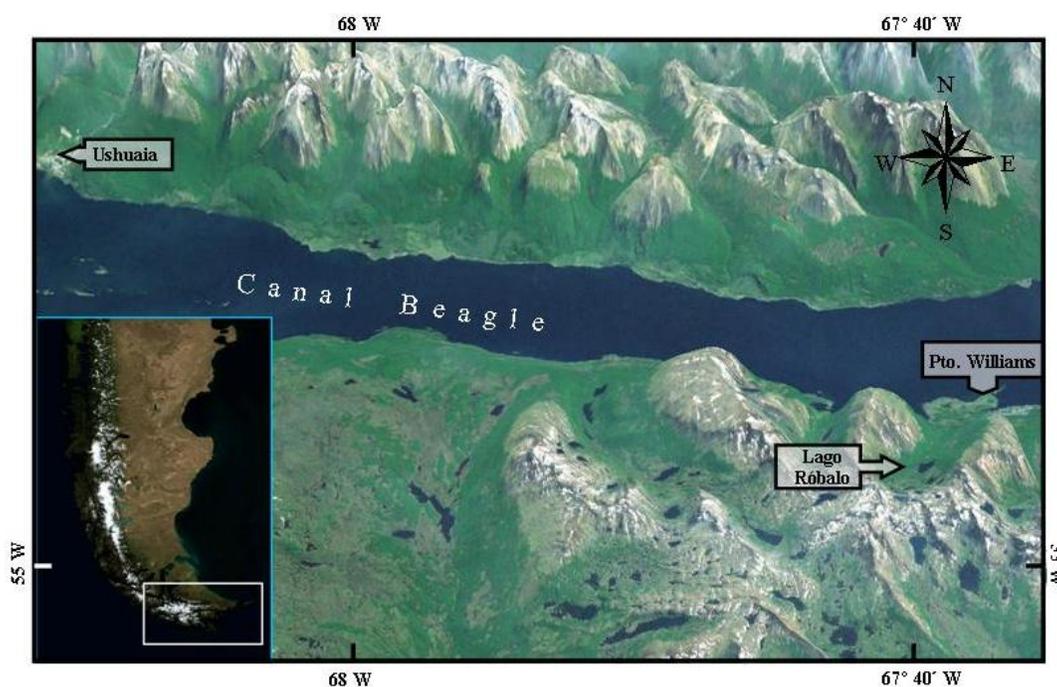


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio en Lago Róbalo, Isla Navarino.

En relación a la vegetación acompañante, Donoso (2006) afirma que, *N. betuloides* se asocia con *N. pumilio* desde aproximadamente los 45°-55° S. Frecuentemente el sotobosque está dominado por especies como *Berberis ilicifolia* y *Maytenus magellanica* como arborescente (Donoso, 2006). Sin embargo la población muestreada corresponde a un bosque adulto y puro de *N. betuloides*, además heterogéneo en cuanto a tamaño de copas y estructura con individuos de diámetros medios de 50 cm. La composición de estos bosques presenta una alta representación de árboles senescentes, muertos en pie y abundantes troncos caídos sobre el suelo.

El clima predominante para la zona, de acuerdo a la clasificación de Köppen, corresponde a un clima templado frío con gran humedad, con precipitaciones que van entre los 500 a 1000 mm al año, sin presentar estacionalidad en la distribución de estas, y con una temperatura media anual cercana a los 6° C. El mes más cálido presenta temperaturas medias de 9,2° C y el mes más frío de 1,2° C (basados en las series de tiempo de temperatura y precipitación de Ushuaia, figura 2).

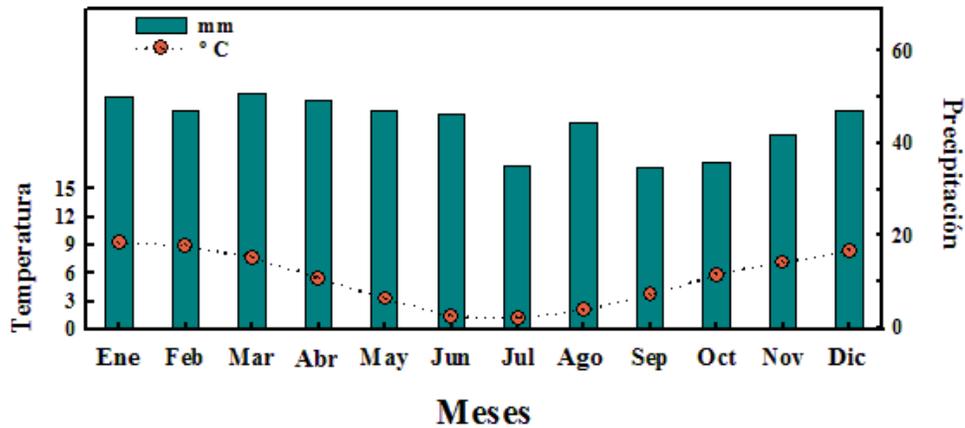


Figura 2. Temperatura media (°C) y precipitación (mm) mensual para la estación de Ushuaia, Argentina.

Según Pisano (1977) los suelos dominantes de ésta Región Archipiélago, se desarrollan bajo condiciones templado-frío con baja variación térmica, además carecen de materiales volcánicos recientes, y su pedogénesis está influenciada por fenómenos glaciales y post-glaciales (Christie *et al.* 2005).

Los suelos en que crece *N. betuloides* corresponden a suelos jóvenes, poco evolucionados y muy ácidos. La mayor parte de estos suelos corresponde al orden de Spodosol e Inceptisol, los primeros presentes en sectores de baja elevación y los segundos generalmente se encuentran presentes en toda la topografía (Gerding *et al.* 2002).

3.2 Desarrollo de la cronología

3.2.1 Colecta de muestras en terreno

El muestreo dendrocronológico, se llevó a cabo durante los años 2004 y 2009, en los cuales se colectaron tarugos de incremento de 38 árboles vivos y 26 secciones transversales o rodelas de árboles muertos por causas naturales. A través de un taladro de incremento se extrajeron 1 ó 2 radios por árbol vivo seleccionado. Para el muestreo de los árboles vivos se seleccionaron los árboles dominantes de mayor diámetro y buena sanidad. Además a cada individuo vivo muestreado se le registró el diámetro a la altura del pecho (DAP).

La codificación asignada a las muestras colectadas es LRB, la cual corresponde a la abreviatura del sitio de muestreo Lago Róbalo e indicando, además, el número del árbol y el radio correspondiente (A o B).

3.2.2 Procesamiento y cofechado de las muestras

Las muestras fueron preparadas siguiendo las técnicas dendrocronológicas descritas por Stokes and Smiley (1968). Esto incluyó el montaje de los tarugos sobre molduras acanaladas y el posterior lijado utilizando papel de lija de granulometría ascendente (entre 150 a 800 granos/cm²). El mismo procedimiento de lijado se utilizó para las muestras de sección transversal. Una vez lograda la perfecta visualización de los anillos de crecimiento, se procedió al fechado de cada muestra bajo lupa estereoscópica. Para el fechado de las muestras provenientes de árboles vivos se siguió la convención de Schulman (1956) para el hemisferio sur, y a cada anillo de crecimiento se le asignó el año calendario en el cual comenzó su crecimiento. Para las muestras provenientes de árboles muertos se realizó un fechado de anillos en el sentido médula-corteza. Posterior al fechado se realizó la medición de los anillos para cada una de las muestras (tarugos y rodelas) utilizando un dendrómetro VELMEX Inc. con una precisión de 0,001 mm.

Para verificar la calidad del fechado y detectar posibles errores de medición, se utilizó el programa computacional COFECHA (Holmes, 1983). Para las series en las que el programa COFECHA identificó errores en el fechado y que una vez revisadas bajo lupa no se logró identificar el error, se graficaron utilizando la rutina BARPLOT de la librería de programas dendrocronológicos (DPL), el cual muestra la desviación estándar de cada serie individual. A través de la comparación de la serie a

evaluar con la serie maestra o promedio creada por el COFECHA se identificó, de manera correcta, el o los anillos que por error se pudieron haber omitido o simplemente corresponden a anillos ausentes en la muestra.

El cofechado de las rodela, que permite asignar fechas exactas a cada anillo, se realizó una vez que se cofecharon un número importante de tarugos provenientes de árboles vivos, para así tener mayor seguridad de que el año calendario asignado, es el correcto.

3.3 Construcción de la cronología

Utilizando las series de anillos ya cofechadas, se desarrolló la cronología de ancho de anillos utilizando el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1984). Dicho programa realiza una estandarización ajustando la series de crecimiento individual a diferentes curvas teóricas (recta, exponencial negativa, horizontal o spline de diferente rigidez). En este estudio se utilizó la opción 1 del ARSTAN, la cual realiza un ajuste de las curvas de anchos de anillos a una exponencial negativa o en su defecto a una regresión lineal. A través de esto se elimina el efecto en la disminución del crecimiento debido a la edad del árbol, cambios en su geometría, y se preserva la varianza de baja frecuencia presente en las series. La curva resultante estandarizada presenta una media igual a 1 y una varianza relativamente homogénea a lo largo de los años (Fritts, 1976).

El programa ARSTAN genera tres cronologías (ESTÁNDAR, RESIDUAL Y ARSTAN). La ESTÁNDAR es el resultado de la estandarización de las series individuales de ancho de anillos a través de una media robusta, removiendo la varianza no debida al clima y promediándolas para obtener la cronología. La RESIDUAL es calculada a partir de los residuos del modelo de autoregresión donde una vez ajustadas las curvas de crecimiento, son promediados estadísticamente obteniendo la cronología. En esta cronología se ha eliminado la autocorrelación (correlación del ancho de anillo de un año determinado y el ancho del anillo o de los años posteriores) presentando una uniformidad semejante en la varianza a lo largo del tiempo. Para la cronología ARSTAN se incorporan los coeficientes del modelo de regresión a los valores residuales previamente logrados desde el modelo de autoregresión para luego ser promediados estadísticamente (Neira, 1995).

El programa ARSTAN ofrece un menú con diversas posibilidades de tratamientos y manipulación de las series y entrega detallados análisis estadísticos con el fin de lograr la mejor cronología. La salida entrega información como sensibilidad media, autocorrelaciones, la señal

expresada de la población (EPS), R-Bar, entre otros parámetros, que se utilizaron para el análisis de los datos.

3.4 Relación con variables climáticas

3.4.1 Relación entre el clima local y la Oscilación Antártica (AAO)

Para evaluar la relación existente entre el clima local cercano al sitio de estudio y la AAO, se utilizaron una serie de registros de las estaciones meteorológicas más completas, ubicadas al sur de la región de Magallanes (Cuadro 1).

Cuadro 1. AAO y estaciones meteorológicas utilizadas correspondientes a la Región de Magallanes.

Variable Climática	Ubicación	Elevación (m s.n.m)	Periodo de registro	Fuente
▪ AAO	---	---	1948 - 2002	JISAO
▪ Temperatura				
Punta Arenas (Min-Max)	53°00`S – 70°51`O	37	1930 - 2008	DCM
Ushuaia (Media)	54°40`S – 68°10`O	40	1901 - 2008	GHCN
▪ Precipitación				
Evangelistas	52°24`S – 75°06`O	55	1899 - 2000	DCM, GHCN
M. Fagnano	52°54`S – 70°54`O	32	1919 - 2007	DCM
Punta Arenas	53°00`S – 70°51`O	37	1888 - 2005	DCM, GHCN
Ushuaia	54°40`S – 68°10`O	40	1931 - 2005	GHCN

DMC, Dirección Meteorológica de Chile; GHCN, Global Historical Climate Network; JISAO, Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean.

Con la finalidad de contar con un mayor número de registros de variables climáticas para los análisis, se obtuvieron datos de temperatura media y precipitación total mensual del reanálisis grillado de 2.5° x 2.5° del Centro Nacional de Predicción Ambiental - Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP-NCAR) (Kalnay *et al.*, 1996), para el área comprendida entre los 53°45`S – 56°15`S y 67°30`O – 70°00`O.

Para determinar las relaciones mensuales de la AAO con la precipitación y la temperatura, se desarrollaron comparaciones visuales y correlaciones mensuales entre los registros. Todas las correlaciones entre las series se ejecutaron luego de pre-blanquearlas mediante un modelado

autorregresivo, para eliminarles la autocorrelación serial con el fin de evitar sobrestimaciones en los coeficientes de correlación.

3.4.2 Relación entre crecimiento radial de *N. betuloides* y el clima local y de gran escala

Para identificar las relaciones entre los anillos y el clima, se realizaron funciones de correlación entre los índices de ancho de anillos y la AAO, la temperatura, la precipitación total mensual para las estaciones meteorológicas anteriormente mencionadas (Blasing *et al.*, 1984). El análisis de funciones de correlación, permite obtener la relación estadística entre la cronología de ancho de anillos y cada variable climática mensual, a través del período común entre la cronología y el registro climático instrumental. De esta forma se identifica la variable climática y los meses que presentan la correlación más alta con el ancho de anillo. Ya que el ancho de un anillo anual es la integración de los procesos de influencia climática ocurridos sobre un extenso período que puede llegar a abarcar incluso el año previo (Fritts 1976), las correlaciones entre anillos y clima se efectuaron para el período comprendido a partir de junio de la estación de crecimiento anterior a mayo del año en curso de la formación del anillo, con un total de 24 meses (Anexo 3 y 4).

Finalmente para determinar la relación entre el crecimiento radial de *N. betuloides* y los patrones de circulación asociados a diferencias de presión, se calculó un mapa de correlación entre la cronología estándar de ancho de anillos y el promedio mensual grillado de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ de la altura geopotencial de 850 hPa. Los datos grillados fueron obtenidos de la base de datos de Centro Nacional de Predicción Ambiental - Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP-NCAR) reanálisis (Kalnay *et al.* 1996).

4. RESULTADOS

4.1 Relación de la Oscilación Antártica (AAO) y el clima local

Se elaboró una serie regional de temperaturas utilizando el registro de temperaturas máxima de Punta Arenas y medias de Ushuaia, las cuales muestran una alta similitud a lo largo del tiempo (Figura 3). Esta nueva serie de temperatura se utilizó en las funciones de correlación expuestas en este trabajo.

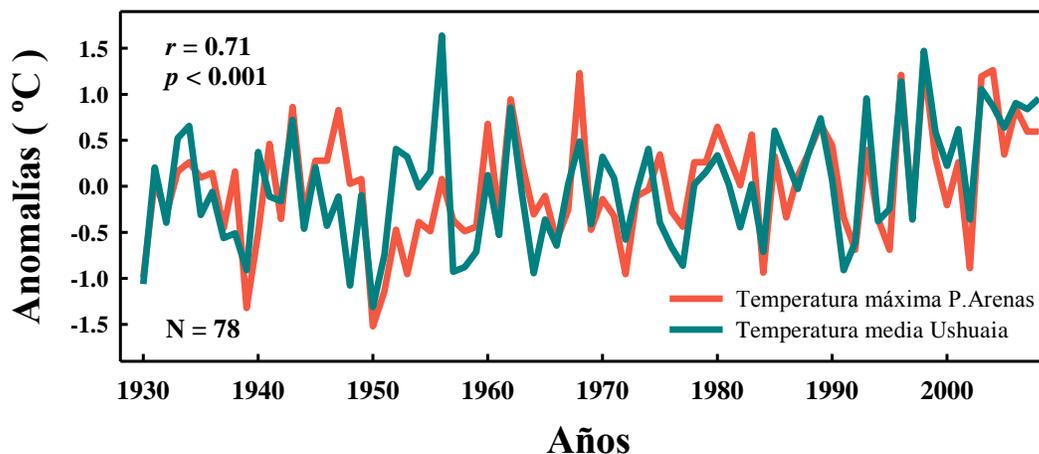


Figura 3. Series de tiempo de los registros de anomalías de la temperatura máxima de Punta Arenas y media de Ushuaia. N= número de años utilizados para el análisis.

La AAO, como el modo dominante de la variabilidad climática en altas latitudes del hemisferio sur, se correlacionaron mes a mes con las variables climáticas para el área de estudio. Se puede observar que existe una correlación positiva con la temperatura durante todo el año y significativa para julio-agosto, octubre-noviembre y entre febrero a mayo. Es importante destacar el mes de febrero donde se presenta la mayor correlación con un valor de $r = 0,62$. En contraposición, la relación entre la AAO y la precipitación de Ushuaia presenta correlaciones negativas pero sólo significativas durante el mes de agosto (Figura 4).

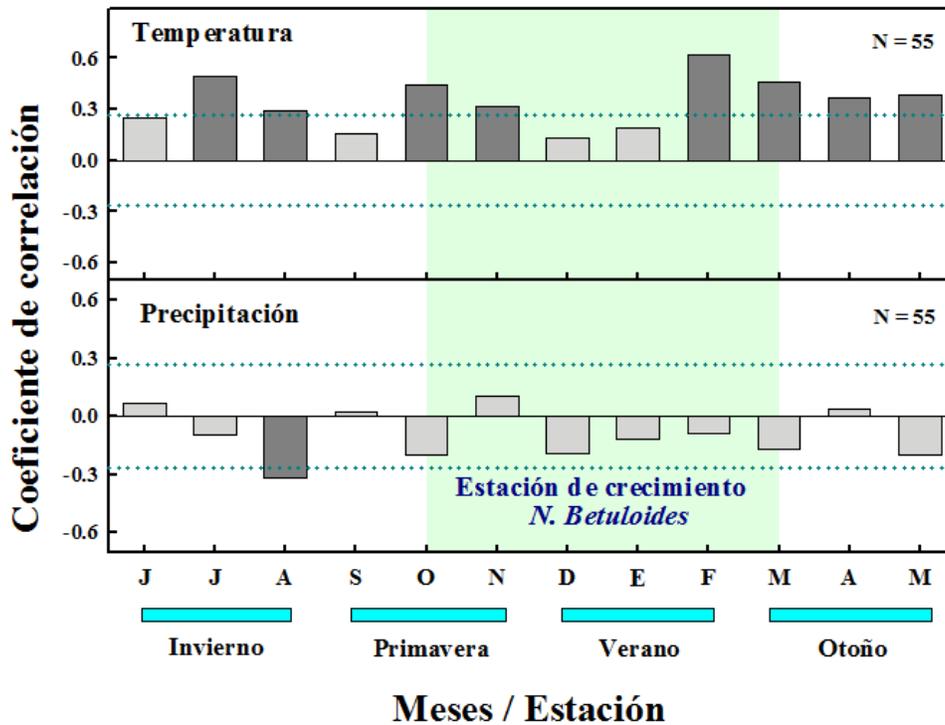


Figura 4. Correlaciones mensuales entre el Índice de Oscilación Antártica (AAO) y la temperatura promedio de Punta Arenas - Ushuaia y la precipitación mensual total de Ushuaia. Las líneas segmentadas corresponden a la significancia estadística al nivel de confianza de 95%. El N indica el número de años para cada correlación. Todas las correlaciones están realizadas sobre los valores preblanqueados de las series de tiempo. La barra vertical coloreada de celeste indica aproximadamente la estación de crecimiento de *N. betuloides*.

4.2 Cronología de ancho de anillos

La cronología de *N. betuloides* para el sector Isla Navarino tiene una extensión de 513 años cubriendo el periodo de tiempo que va desde 1489 hasta el 2002. La media en años para todas las series es de 220 ± 68 años.

El número de series por año, para la extensión total de la cronología, va desde 2, a partir de 1489 a 1505, un máximo de 76 series para el año 1860 y 39 radios al final de la cronología, desde 1996 al 2002. El periodo con mayor replicación de series se encuentra entre 1690 y 1965 (> 45 radios) (Figuras 5 y 6). Aunque el periodo total que abarca la cronología va desde 1489 a 2007, para los respectivos análisis, se utilizó el período comprendido entre 1600 a 2002, debido a que anterior y posterior a estos

años, el número de muestras disminuía considerablemente. Además los valores de los estadígrafos EPS (Figura 6) y R-Bar (Anexo 2) se encontraban bajo el nivel de confiabilidad para una cronología de ancho de anillos.

La cronología presenta series de longitud heterogénea, con radios que cubren una extensión de 84 a 384 años. En este último caso, la serie se extiende desde 1618 al año 2002. (Figura 5). Existe un traslapo importante, en años, entre las series de madera subfósil (rodelas) y las series provenientes de árboles vivos (tarugos), lo que indica una completa confiabilidad en las fechas asignadas a las rodelas por la gran cantidad de series para el cofechado. Del total de muestras de material subfósil colectado se logró fechar con éxito un 94% de ellas, demostrando por primera vez la excelente capacidad de fechado de este tipo de material en *N. betuloides*.

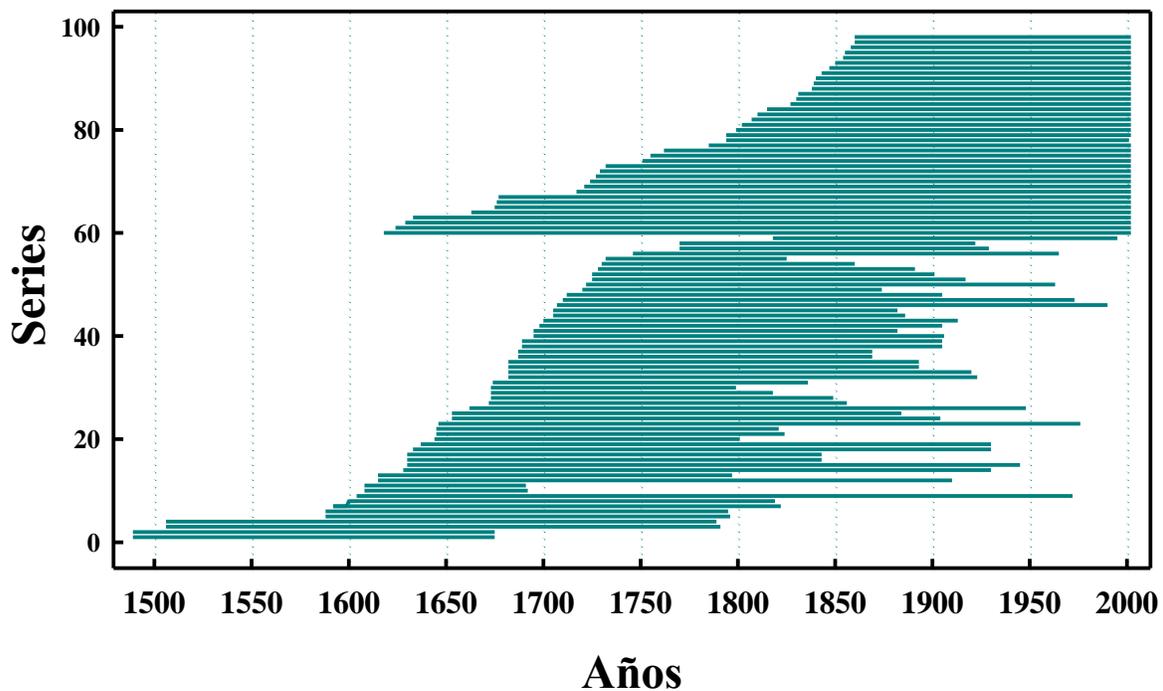


Figura 5. Distribución temporal de cada una de las series utilizadas en la cronología de ancho de anillos de *N. betuloides*. Cada línea horizontal representa una serie.

En la figura 6 se presentan las cronologías desarrolladas en su versión estándar y residual indicando el ancho de anillos como un índice adimensional. Para visualizar las fluctuaciones de baja frecuencia, se ajustó un *spline* que remueve el 50% de la varianza en ondas de 40 y 15 años a las cronologías estándar y residual, respectivamente. En las cronologías, principalmente en la estándar, se

encuentran diversos períodos donde se aprecia una marcada disminución y/o aumento en el crecimiento. Se observan periodos de crecimiento bajo la media como son 1638-1685, 1706-1754 (período en el cual se presenta el año de menor crecimiento, correspondiente a 1723), 1836-1870 y 1930-2002. Es importante destacar este último período, ya que es donde se aprecia la mayor caída en el crecimiento, tomando en cuenta la extensión total de la cronología. Esto mayormente reflejado a partir de 1980 hasta el 2002. Además, la cronología presenta periodos de crecimiento por sobre la media entre los años 1615-1638, 1685-1706, 1754-1836 y 1870-1930, período en el cual, se presenta el año de máximo crecimiento (1876).

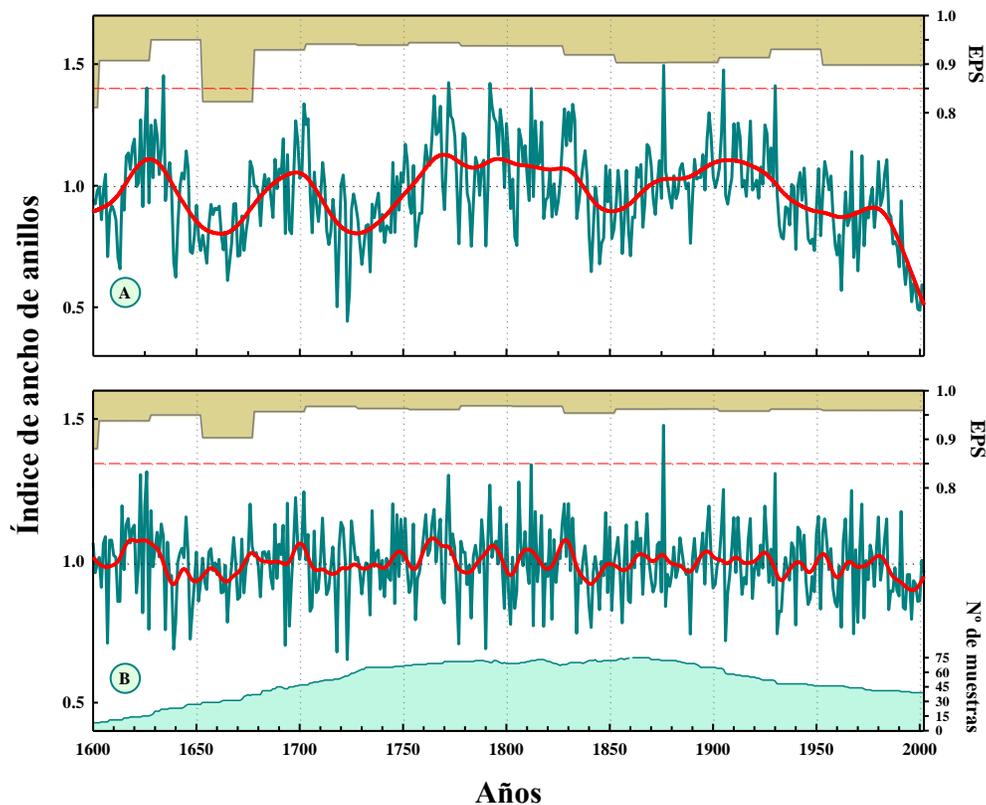


Figura 6. Cronologías de índice de anchos de anillos para *N. betuloides* en su versión estándar (A) y Residual (B). En color rojo se muestra los índices suavizados con un *spline* cúbico de 40 años (A) y 15 años (B). Además se presenta el estadístico EPS (señal expresada de la población) y número de muestras por año para cada cronología.

Un resumen de los estadígrafos obtenidos en esta cronología, a través del programa ARSTAN, se presenta en el cuadro 2.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos para las cronologías estándar y residual de *N. betuloides*.

Estadísticos	Cronología Estándar	Cronología Residual
Número de árboles	49	49
Número de series	98	98
Correlación entre series	0,52	0,52
Desviación estándar	0,20	0,13
Sensibilidad media	0,14	0,15
Autocorrelación orden 1	0,56	-0,08
EPS	0,92	0,96
R-Bar	0,21	0,32

4.3 Relaciones entre el crecimiento de *N. betuloides* y el clima local y de gran escala.

Los registros de temperatura y precipitación corresponden a la estación de Ushuaia. Estos fueron seleccionados debido a su cercanía del sitio de estudio y por su extensión que van desde 1901 a 2008, para la temperatura, y de 1931 a 2005 para precipitación (Cuadro 1). En el diagrama ombrotérmico se puede observar que no existe estacionalidad de las precipitaciones, presentando solo, una leve disminución de estas entre los meses de julio a octubre. La estacionalidad está marcada por las temperaturas medias, con registros máximos cercanos a 10° C para los meses más cálidos como enero-febrero y mínimos de 1.2° C para los meses más fríos como junio y julio (Figura 7).

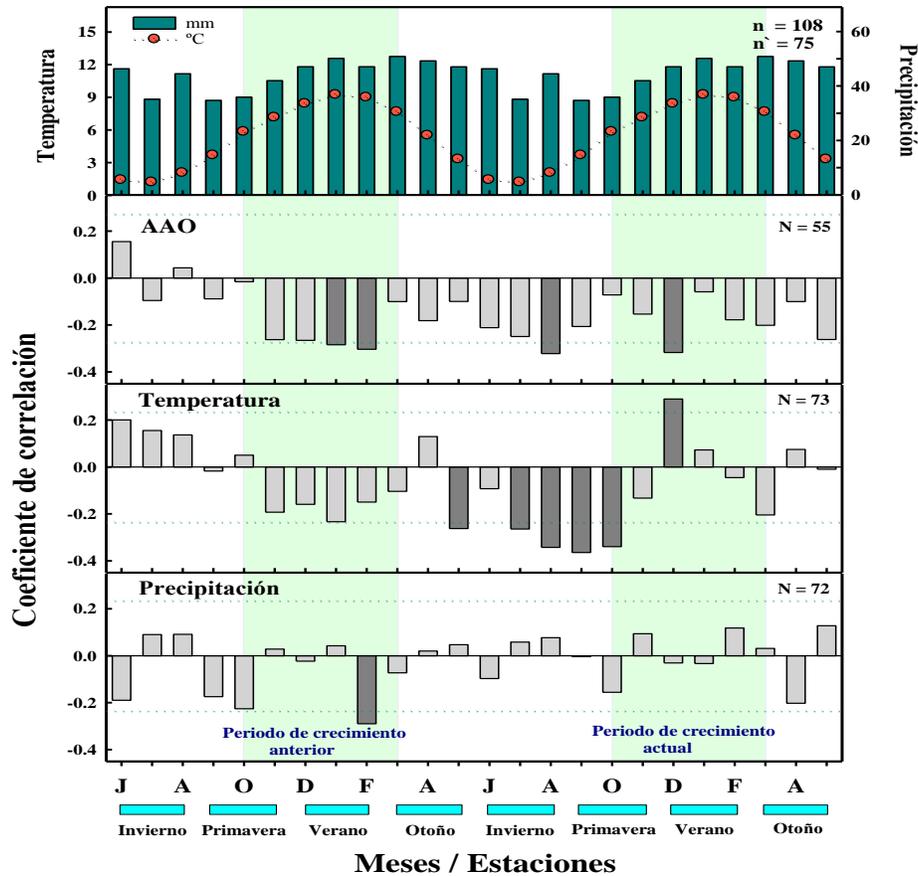


Figura 7. Media mensual de temperatura (°C) y precipitación (mm) de Ushuaia y funciones de correlación entre la cronología residual de *N. betuloides* y el promedio de temperatura de Punta Arenas y Ushuaia, precipitación (Ushuaia) y la AAO, para el año anterior y actual de la formación del anillo (n y n`= longitud del registro de temperatura y precipitación, respectivamente; N= número de años para la correlación). Todas las correlaciones están realizadas sobre los valores pre-blanqueados de las series de tiempo. Las líneas segmentadas corresponden a la significancia estadística al nivel de confianza de 95%.

La figura 7 muestra también, las funciones de correlación entre la cronología de ancho de anillos, en su versión residual, el clima local y el forzante climático de gran escala (AAO). Dichas funciones muestran que el crecimiento de *N. betuloides* está relacionado con la temperatura, presentando una correlación negativa significativa principalmente en las estaciones de otoño (para el mes de mayo), invierno y principios de primavera de la estación de crecimiento actual. Solo para el mes de diciembre del periodo de crecimiento actual, la cronología presenta correlación positiva significativa con la temperatura. Con la precipitación, en cambio, las correlaciones no son significativas, presentando

valores positivos y negativos sin una tendencia marcada para una estación en particular. Con la AAO, al igual que con la temperatura, presenta una correlación negativa casi en la totalidad de los meses analizados, tanto para el período anterior y actual de la estación de crecimiento.

La mejor combinación de meses entre la cronología y las variables AAO y el promedio de la temperatura son presentados en la figura 8. Se aprecia una correlación negativa entre la cronología y la AAO para el periodo noviembre previo y octubre actual de la estación de crecimiento ($r = -0,39$; $p < 0,01$). Ambas series de tiempo presentan similares tendencias, aunque no tan claras debido al bajo valor de r . Al igual que con la AAO, la cronología de ancho de anillos, presenta una correlación negativa con la temperatura, pero en este caso para el período comprendido entre mayo a noviembre de la estación de crecimiento actual ($r = -0,46$; $p < 0,01$). En este caso se apreciar una mayor similitud entre la variabilidad anual de ambas series de tiempo, esto debido al aumento en el valor de correlación (considerar que la cronología fue invertida para una mejor comparación en ambos análisis).

La correlación entre las series de tiempo de la cronología y la precipitación no se muestra debido a que no presenta valores significativos lo cual dificulta su comparación.

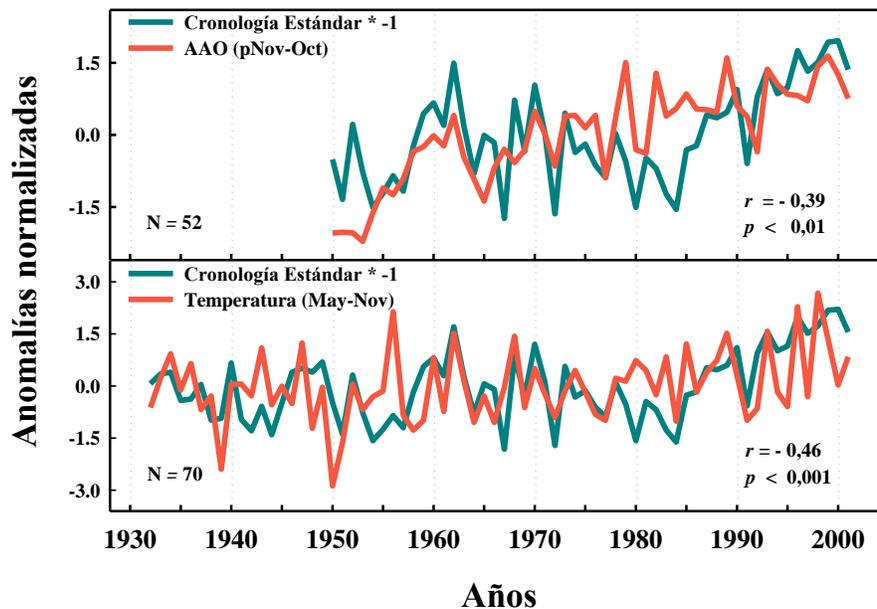


Figura 8. Comparación de las series de tiempo de la cronología de ancho de anillos, en su versión estándar, con la mejor combinación de meses con la AAO (pNov corresponde al mes de noviembre previo a la estación de crecimiento) y el promedio de temperatura de Punta Arenas- Ushuaia. La cronología estándar se ha invertido para una mejor comparación visual con la AAO y la temperatura. El r corresponde al valor obtenido entre las series pre-blanqueadas. N= número de años para el análisis.

Existe una correlación positiva significativa entre la altura geopotencial 850 hPa y la cronología estándar de *N. betuloides* para el periodo noviembre previo y octubre actual de la estación de crecimiento, con un r entre 0,3 a 0,4 para un nivel de significancia estadística de 95% de confianza (figura 9). Se analiza el periodo anteriormente mencionado debido a que presenta la mayor correlación entre cronología y la AAO (Figura 8).

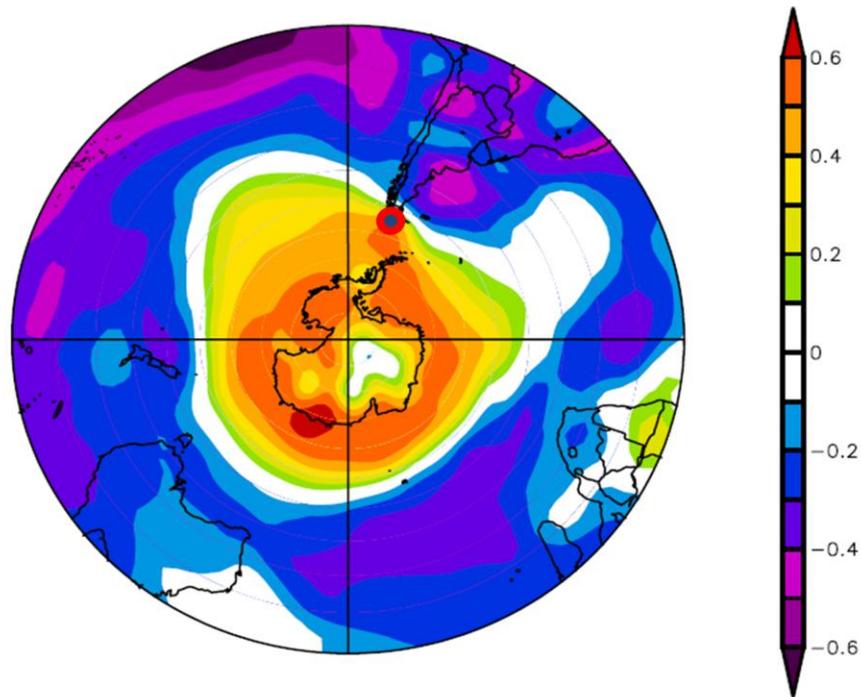


Figura 9. Mapa de correlación entre la altura geopotencial de 850 hPa y la cronología estándar de *N. betuloides* para el periodo noviembre previo y octubre actual de la estación de crecimiento, período 1949-2002. Los datos de altura geopotencial se obtuvieron del reanálisis NCEP-NCAR. Los intervalos de significancia para un $p < 0,05$ son de $< -0,27$ y $> 0,27$. El sitio de estudio se encuentra representado por un círculo rojo y azul.

5. DISCUSIÓN

5.1 Cronología de ancho de anillos

La cronología presentada en este trabajo, corresponde a la más extensa y mayormente replicada desarrollada para *N. betuloides* en Chile y Argentina hasta la fecha. Además corresponde a una de las más extensas desarrolladas para el género *Nothofagus* en Sudamérica. Anterior a este estudio solo dos cronologías de *N. betuloides* han sido registrada en literatura, correspondientes a las desarrolladas por Szeicz (1997) en las zonas costeras de la Región de Aysén (45 - 46° S). Otras cronologías han sido desarrolladas en la Patagonia Chilena y Argentina pero los resultados no han sido publicados hasta la fecha.

De un total de 128 radios extraídos, el 76% de las muestras cofecharon (98 radios), correspondientes a 49 tarugos y 49 rodela. Del total de las rodela (52 radios) el 94% de estas cofecharon, este valor porcentual indica que existe un gran potencial para utilizar material subfósil en el desarrollo de cronologías de *N. betuloides* en estudios futuros.

La correlación entre las series para la cronología obtenida mediante el programa COFECHA es de 0,52 (Cuadro 2), valor que resulta ser similar al resto de las cronologías de *N. betuloides* en la Patagonia Argentina, desarrolladas por Boninsegna y obtenidas del Banco internacional de base de datos de ancho de anillos. Además se puede observar que el valor de sensibilidad media de este sitio (Cuadro 2), se encuentra dentro de los rangos obtenidos para las dos cronologías de *N. betuloides* desarrolladas por Szeicz (0,11 y 0,18). Lo anterior refleja que el sitio de estudio presenta, en comparación a los otros sitios aquí considerados, características intermedias para la realización de estudios dendroclimáticos.

La cronología muestra diversos períodos de crecimiento por sobre y bajo la media, se aprecia mayormente en la versión estándar. Altos índices de incremento para los períodos comprendidos entre 1615 -1638, 1685 - 1706, 1754 - 1836 y 1870 - 1930. Por el contrario, crecimientos bajo la media se observan entre los años 1638-1685, 1706-1754, 1836-1870 y 1930-2002 (Figura 6). Destaca la fuerte disminución en las tasas de crecimiento observada a partir de 1980, correspondiendo al mayor decrecimiento encontrado en toda la extensión de la cronología, lo cual evidencia que en las últimas tres décadas se han presentado condiciones ambientales muy restrictivas, no presentes en los años anteriores, para el crecimiento de *N.betulodes* en la Isla Navarino.

5.2 Relación de la AAO y el clima local

La influencia de la AAO en el clima local del extremo sur de América, se ve reflejado en los resultados presentados en este trabajo (Figura 4). La AAO modula la temperatura durante todo el año, presentado una correlación positiva anual y estadísticamente significativa para los meses de julio-agosto, octubre-noviembre y desde febrero a mayo. Existe un incremento sostenido de las temperaturas medias anuales en las últimas décadas, que según Garreaud *et al.* (2009) se encuentra asociado a la prevalencia de la fase positiva de la AAO.

La relación existente entre la AAO y la precipitación de Ushuaia, presentado en el análisis mes a mes, es muy débil, encontrándose correlaciones tanto positivas como negativas. Aunque predominen las correlaciones negativas, solo presenta un valor estadísticamente significativo para el mes de agosto (figura 4). Esta débil relación fue descrita por Garreaud *et al.* (2009) mostrando una disminución de las precipitaciones durante la fase positiva de la AAO, que se manifiesta mayormente alrededor de los 40° de latitud sur.

5.3 Relación entre anillos y el clima

La cronología de ancho de anillos desarrollada en este trabajo, muestra las respuestas del crecimiento de los árboles a las fluctuaciones climáticas. Principalmente el crecimiento de *N. betuloides* está modulado por la temperatura local, presentando correlaciones negativas para la gran mayoría de los meses analizados a través de las funciones de correlación (Figura 7). Dicha relación se manifiesta con valores estadísticamente significativos en invierno previo y principios de primavera de la estación de crecimiento actual. La explicación de esta relación podría atribuirse a que la demanda de evaporación, y por ende de evotranspiración, es alta, debido al aumento sostenido de las temperaturas anuales registradas para los últimas décadas produciendo déficit hídrico durante el periodo de crecimiento de *N. betuloides*. Esta condición podría ser el reflejo de la fuerte disminución del crecimiento que ha manifestado la especie a partir de 1980. Además los fuertes vientos y los altos niveles de radiación producirían desecación del suelo y una eventual muerte de las hojas y otros tejidos, dando lugar a correlaciones bajas o negativas entre las temperaturas de primavera y el crecimiento de los árboles (Szeicz, 1997).

Otra opción, también ligada a un potencial déficit hídrico, tendría relación con el aumento significativo de la temperatura de invierno y primavera, las cuales estarían influenciando directamente

en la disponibilidad de agua para el crecimiento de *N. betuloides*, ya que las altas temperaturas harían que la precipitación no sea nival sino que en forma de agua y además, la capa de nieve caída durante la época invernal se derrite en primavera y por ende quedaría poca agua proveniente de deshielo disponible para el crecimiento de verano. Por lo cual la correlación negativa entre el crecimiento de *N. betuloides* y la temperatura, principalmente de invierno y primavera estaría explicada por el déficit hídrico que sufriría esta especie durante los meses de mayor actividad cambial, en el sitio de Navarino.

La relación existente entre el crecimiento de *N. betuloides* con la precipitación es débil, sólo significativa para febrero de la estación de crecimiento anterior. Esto debido a que, probablemente, la precipitación sea muy variable y los registros no reflejan la precipitación real que en el sitio de estudio. Con la AAO, en cambio, presenta una correlación negativa casi en la totalidad de los meses analizados, tanto para el período anterior y actual de la estación de crecimiento. Esto también se observa en el mapa de correlación entre la altura geopotencial de 850 hPa y la cronología estándar de *N. betuloides* para el periodo noviembre previo y octubre actual de la estación de crecimiento, correspondiente a la mejor combinación de meses entre la cronología y la AAO (Figura 9). Como la presión y la altura geopotencial se relacionan positivamente, un aumento de la altura geopotencial significa también un aumento en la presión, en este caso en la Antártica y debido a ello mayor presión en la Antártica significa una fase negativa de la AAO y por ende una correlación positiva entre la altura geopotencial sobre la Antártica y la cronología de *N. betuloides* en la Isla Navarino.

Finalmente, las cronologías de *N. pumilio* desarrolladas por Aravena, *et al.* (2002) en la Isla Navarino, presentaron un patrón de crecimiento adicional, con ciclos marcados de 7 años, los cuales podrían estar asociados a las condiciones climáticas locales o de interacciones biológicas asociadas a brotes de insectos defoliadores del género *Ormiscodes* spp. En contraposición, la cronología desarrollada en este trabajo no presenta este patrón de crecimiento, lo que indica que la señal expresada por el crecimiento de la especie se debe a las variables climáticas, en este caso a la temperatura. Esto demuestra que este estudio presenta información confiable de la relación existente entre el clima local y el crecimiento de *N. betuloides* en la Isla Navarino, presentando un gran potencial para realizar reconstrucciones de temperatura y la AAO en los últimos siglos.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo de una nueva cronología de ancho de anillos de *N. betuloides*, es un aporte al esfuerzo por construir redes de cronologías, para la Patagonia Austral de Chile y Argentina y que se suma a las ya existentes de *N. pumilio* y *P. uviferum*. Además se destaca por ser la cronología más extensa y mayormente replicada no sólo para la especie de *N. betuloides* sino que la más extensa desarrollada para el género *Nothofagus* en el extremo sur de América.

El crecimiento de *N. betuloides* en los bosques de la Isla Navarino, muestra una correlación negativa significativa con la temperatura de invierno y mediados de primavera (julio a octubre) de la estación de crecimiento actual, posiblemente atribuible al déficit hídrico que estaría sufriendo la especie, debido al aumento de las temperaturas. Algo similar ocurre con la AAO presentando una marcada correlación negativa para casi la totalidad de los meses analizados. En contraposición la precipitación muestra una relación débil con el crecimiento de *N. betuloides*.

La clara definición de los anillos de crecimiento de *N. betuloides* y su relación con el clima local y la AAO, convierten a esta especie en una buena fuente de información paleoclimática. Con los resultados obtenidos se puede indicar que esta es una especie con potencial para realizar reconstrucciones de climáticas para los últimos siglos.

La utilización de material subfósil (rodela), para el desarrollo de la cronología de ancho de anillos de *N. betuloides*, muestra un interesante potencial, ya que de los 52 radios utilizados en el análisis, 49 de estos cosecharon (94%). Además se logró robustecer y aumentar en 150 años la extensión total de la cronología bien replicada.

El presente trabajo abre la posibilidad para la realización de nuevos estudios, que permitan determinar con certeza, en base a la cronología de ancho de anillos de *N. betuloides* desarrollada, el porqué de esta relación negativa entre la temperatura y el crecimiento de estos bosques en la Isla Navarino, en contraposición a lo descrito en otros estudios para la misma zona, aunque con otra especie (*N. pumilio*).

7. REFERENCIAS

- Aravena JC, Lara A, Wolodarsky-Franke A, Villalba R, Cuq E. 2002. Tree ring growth patterns and temperature reconstruction from *Nothofagus pumilio* (Fagaceae) forests at the upper tree line of southern Chilean Patagonia. *Revista Chilena de Historia Natural* 75(2). 361-376.
- Armesto JJ, León-Lobos P, Arroyo MT. 1996. Los bosques templados del sur de Chile y Argentina: Una Isla Biogeográfica. Ecología de los bosques nativos de Chile (eds J.J. Armesto, C. Villagrán y M.T.K. Arroyo). Santiago, Chile. Universitaria. 23-28
- Blasing TJ, Solomon AM, Duvick DN. 1984. Response Functions Revisited. *Tree-Ring Bulletin* 44: 1-15.
- Boninsegna, J. Argollo, J. Aravena, J.C. Barichivich, J. Christie, D. Ferrero, M. Lara, A. Le Quesne, C. Luckman, B. Masiokas, M. Morales, M. Oliveira, J. Roig, F. Srur, A. Villalba, R. 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 210-228.
- Christie, D. Charlín, R. McGehee, S. Arango, X. Alvarez, R. Rozzi, R. 2005. Relevamiento de Línea Base Seno Lautau Isla Navarino, Provincia de Antártica Chilena. Parque etnobotánico OMORA. Fundación OMORA. 33 p.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe Final. Departamento de Geofísica Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. 63 p.
- D'Arrigo R, Villalba R. 2000. Review of dendroclimatic research at high latitudes in South America: Indicators of atmosphere-ocean climate variability. *Dendrocronología en América Latina*. F. Roig (ed.). Mendoza, Argentina. EDIUNC: 271-282.
- Donoso, C. 2006. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Valdivia, Chile. 677 p.
- Fritts, H.C. 1976. Tree rings and climate. Academic Press, New York, USA. 567 p.
- Garreaud, R. Vuille, M. Compagnucci, R. Marengo, J. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 180-195.
- Gerding, V. Thiers, O. 2002. Caracterización de suelos bajo bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en Tierra del Fuego, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. vol. 75. pp. 819-833.
- Gray DR. 2008. *Climatic Change* 87: 361-383.

- Gutiérrez, E., V. R. Vallejo, Romaña J, Fons J. 1991. The subantarctic *Nothofagus* forests of Tierra del Fuego: distribution, structure and production. *Oecologia Aquatica* 10: 351-366.
- Hampe A, Petit RJ. 2005. Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters. *Ecology Letters* 8: 461–467.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bull.* 44: 69–75.
- IPCC.2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 996 p.
- Iverson LR, Schartz MW, Brasad AM. 2004. How fast and far might tree species migrate in the eastern United States due to climate change?. *Global Ecology and Biogeography* 13: 209–219.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (3): 437-471.
- Körner Ch, Paulsen J. 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography* 31: 713–732.
- Lloyd AH, Fastie CL. 2002. Spatial and temporal variability in the growth and climate response of treeline trees in Alaska. *Climatic Change* 52: 481–509.
- Neira, E. 1995. Desarrollo de cronologías para Alerce (*Fitzroya cupressoides*) en la Cordillera de la Costa y de los Andes. Tesis de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 112p.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology and Systematics* 37: 637-669.
- Pederson, B.S. 1998. The role of stress in the mortality of Midwestern oaks as indicated by growth prior to death. *Ecology* 79: 79-93.
- Peterson DW, Peterson D.L. 2001. Mountain hemlock growth responds to climatic variability at annual and decadal time scales. *Ecology* 82: 3330–3345.
- Rosenblüth, B. Fuenzalida, H. Aceituno, P. 1997. Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology* 17: 67-85.
- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic change in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson.
- Stokes, M.A., Smiley, T.L., 1968. An introduction to tree-ring dating. Univ. Chicago Press, Chicago.

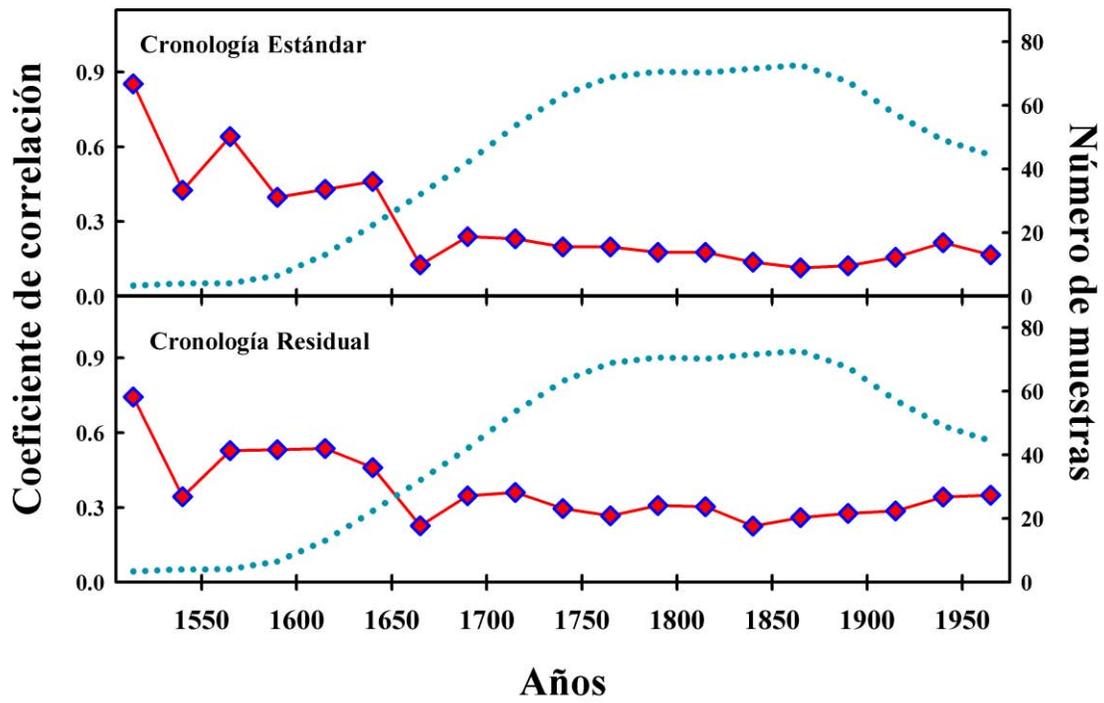
- Szeicz, J. M. 1997. Growth trends and climatic sensitivity of trees in the North Patagonian rain forest of Chile. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 1003-1014.
- Thiers, O. Gerding, V. 2007. Variabilidad topográfica y edáfica en bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en el suroeste de Tierra del Fuego, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 80: 201-211.
- Veblen, TT, Donoso C, Kitzberger T, Rebertus A. 1996. Ecology of Southern Chilean and Argentinean *Nothofagus* forests, pp. 293-353. In: T. T. Veblen, R. S. Hill & J. Read (Eds.). *The Ecology and Biogeography of Nothofagus Forests*. Yale University Press, New Haven, USA.
- Villagrán, C., Moreno, P., y Villa, R. 1996. Antecedentes palinológicos acerca de la historia cuaternaria de los bosques chilenos. En: *Ecología de los bosques nativos de Chile* (eds J.J. Armesto, C. Villagrán y M.T.K. Arroyo). Santiago, Chile. *Universitaria*: 51-70.
- Villalba, R. Lara, A. Boninsegna, J. Masiokas, M. Delgado, S. Aravena, J.C. Roig, F. Schmelter, A. Wolodarsky, A. Ripalta, A. 2003. Large-scale temperature changes across the southern andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years. *Climatic Change* 59: 177-232.
- Villalba R, Masiokas M, Kitzberger T, Boninsegna J. 2005. Biogeographical consequences of recent climate change in the southern Andes of Argentina. In: *Global change and mountain regions an overview of current knowledge* (Eds. Huber, U.M., Bugman, K.M. y Reasoner, M.A.): 157-166.

Anexo 1



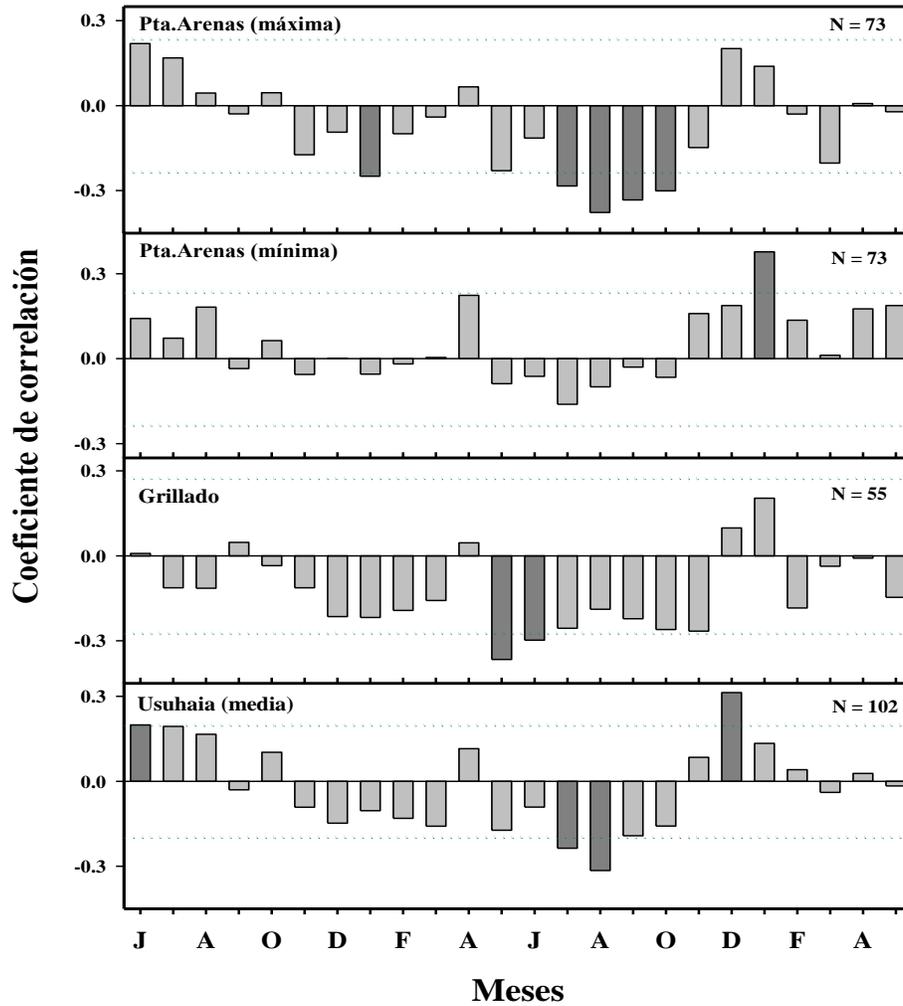
Ubicación del sitio de muestreo en Lago Robalo, Isla Navarino

Anexo 2



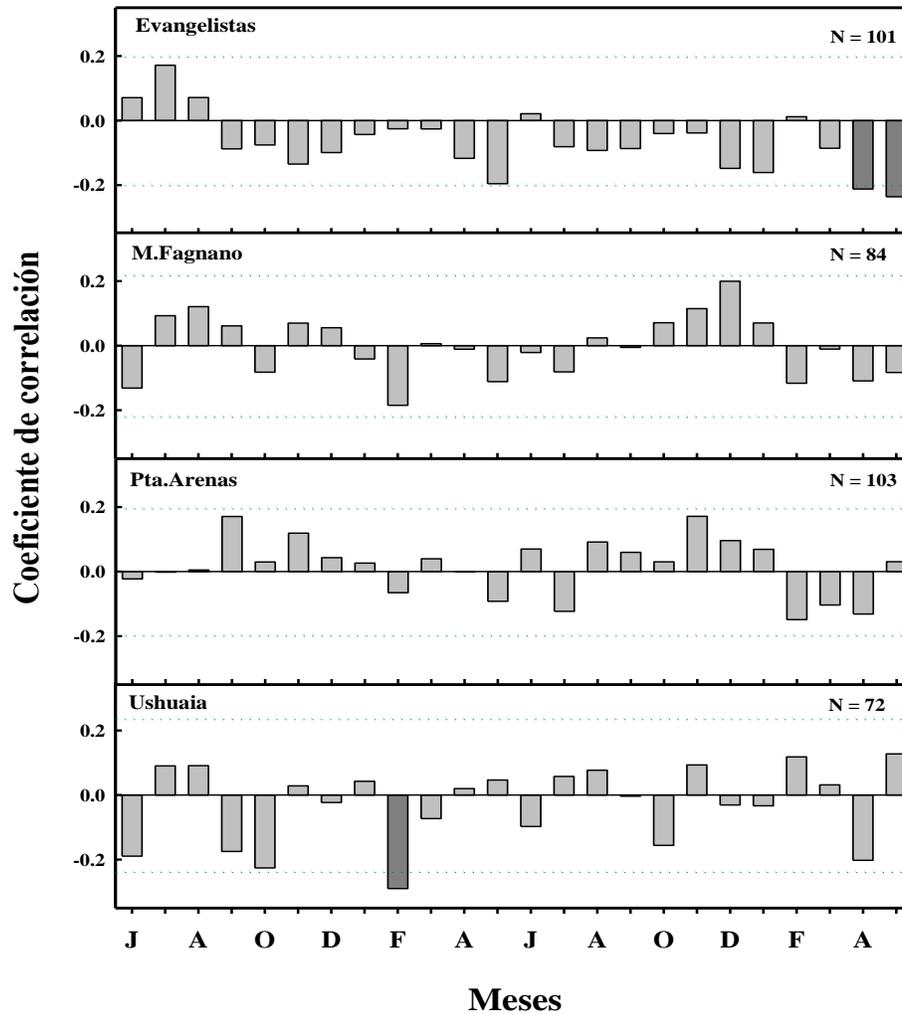
Valores de R-Bar, para periodos de 50 años con traslape de 25 años y número de muestras para la cronología de *N. betuloides* en sus versiones estándar y residual.

Anexo 3



Funciones de correlación entre la cronología Residual de *N. betuloides* y la temperatura de las estaciones cercanas al área de estudio (todos los registros pre-blanqueados). N= número de años para la correlación). Las líneas segmentadas corresponden a la significancia estadística al nivel de confianza de 95%.

Anexo 4



Funciones de correlación entre la cronología Residual de *N. betuloides* y la precipitación de las estaciones cercanas al área de estudio (todos los registros pre-blanqueados). N= número de años para la correlación). Las líneas segmentadas corresponden a la significancia estadística al nivel de confianza de 95%.