



Universidad Austral de Chile  
Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

**Variaciones y cambios en el crecimiento de *Nothofagus betuloides* durante los últimos 300 años y sus relaciones con el clima en Lago Fagnano, Tierra del Fuego, Chile**

Patrocinante: Sr. Duncan Christie  
Co-patrocinante: Sr. Felipe Flores

Trabajo de Tesina presentado como parte  
de los requisitos para optar al Título de  
**Ingeniera en Conservación de Recursos Naturales**

**NICOLÁS IGNACIO MUÑOZ OBREGÓN**

VALDIVIA

2026

|        | Índice de materias   | Página |
|--------|--|--------|
| i      | Calificación del comité de titulación  | i      |
| ii     | AGRADECIMIENTOS  | ii     |
| iii    | DEDICATORIA  | iii    |
| iv     | RESUMEN  | iv     |
| 1.     | INTRODUCCIÓN   | 1      |
| 1.1    | Objetivos específicos  | 3      |
| 2.     | MÉTODOS  | 4      |
| 2.1.   | Área de estudio  | 4      |
| 2.2.   | Recolección muestral   | 6      |
| 2.3.   | Procesamiento de muestras  | 6      |
| 2.4.   | Desarrollo de cronología de ancho de anillos   | 7      |
| 2.5.   | Análisis de patrones de crecimiento  | 8      |
| 2.6.   | Análisis de correlación entre cronologías y variables climáticas                     | 9      |
| 2.7.   | Enfoque analítico  | 10     |
| 3.     | RESULTADOS   | 10     |
| 3.1.   | Construcción de nueva cronología de ancho de anillos                                 | 10     |
| 3.2.   | Actualización y robustecimiento de la cronología de ancho de anillos                 | 12     |
| 3.3.   | Análisis temporal de variabilidad de patrones de crecimiento                         | 14     |
| 3.4.   | Análisis de correlación entre cronologías de ancho de anillos y variables climáticas | 16     |
| 3.4.1. | Correlación entre cronologías de ancho de anillos y la precipitación                 | 16     |
| 3.4.2. | Correlación entre cronologías de ancho de anillo y temperatura media                 | 17     |
| 3.4.3. | Correlación entre cronología de ancho de anillos y temperatura mínima                | 18     |
| 3.4.4. | Correlación entre cronología de ancho de anillos y temperatura máxima                | 19     |
| 3.4.5. | Correlación entre cronologías de ancho de anillos y la Oscilación Antártica (AAO)    | 20     |
| 4.     | DISCUSIÓN  | 22     |
| 5.     | CONCLUSIONES   | 25     |
| 6.     | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS   | 26     |
| Anexos | 1 Gráficos de barra clima/crecimiento ( precipitación)                               |        |
|        | 2 Gráficos de barra clima/crecimiento ( temperatura media)                           |        |
|        | 3 Gráficos de barra clima/crecimiento ( temperatura mínima)                          |        |
|        | 4 Gráficos de barra clima/crecimiento (temperatura máxima).                          |        |
|        | 5 Gráficos de barra clima/crecimiento (Oscilación Antártica).                        |        |

## Calificación del comité de titulación

|                         |                                   | Nota              |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| <b>Patrocinante:</b>    | <b>Sr. Duncan Christie Browne</b> | <b><u>6,8</u></b> |
| <b>Co-patrocinante:</b> | <b>Sr. Felipe Flores Saez</b>     | <b><u>6,6</u></b> |
| <b>Informante:</b>      | <b>Sr. Manuel Suazo Alvarez</b>   | <b><u>6,6</u></b> |
| <b>Informante:</b>      | <b>Sr. Kevin Sharp Rifo</b>       | <b><u>6,6</u></b> |

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 Browne

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría comenzar agradeciendo a todas las personas que fueron parte de este largo proceso. A mi comisión, por su constante apoyo, por el compromiso demostrado en cada etapa y por la paciencia con la que me acompañaron durante el desarrollo de este proyecto. A mi profesor patrocinante, Dr. Duncan Christie, por permitirme ser su tesista y por haber guiado mis primeros pasos en la dendrocronología. Haber tomado su curso optativo fue una verdadera luz en un momento en que me sentía perdido respecto de la dirección que quería darle a mi trabajo de título. A mi copatrocinante y coterráneo, Felipe Flores, gracias por compartir tus conocimientos, por tu ayuda en cada fase de este estudio y por esas conversaciones que, de una u otra forma, me hicieron sentir un poco más cerca de casa. A mis informantes, Kevin Sharp y Manuel, por su buena disposición, por atender cada una de mis dudas con simpatía y siempre con una sonrisa; muchas gracias por su apoyo y generosidad.

Agradezco también a todos los integrantes del Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile. Gracias por permitirme ser parte de ustedes, por su cercanía y cariño, por hacer que cada jornada de trabajo fuera mas amenas y por los espacios de esparcimiento y recreación que nos permitieron conocernos más allá del ambiente académico

Quiero expresar, además, mi agradecimiento más profundo a mi familia. A mi madre y hermana, Soledad y Maite, mis grandes compañeras de vida: gracias por su amor incondicional, por su paciencia en todo momento y por acompañarme en cada una de las decisiones que he tomado. Han sido una fuente inmensa de inspiración y afecto. A mi padre, Marco, gracias por tu amor, por brindarme un espacio seguro para perseguir mis sueños y por los empujones —suaves o firmes— que tantas veces necesité para avanzar. Los tres son pilares de resiliencia y fuerza en mi vida; gracias por todo.

A mis hermanos y a Carlita, gracias por su compañía, por las palabras de ánimo en los momentos necesarios y por estar presentes de una u otra forma en este proceso.

Finalmente, y de manera muy especial, quiero agradecer a mis abuelos Mario y Any. Gracias por haberme criado y por ser los grandes gestores de la persona que soy hoy. Cada vez que pensaba en ustedes, la motivación y ganas de sacar este trabajo adelante se multiplicaban. Este gran logro es mío, pero también es de ustedes.

## DEDICATORIA

*A mis ángeles de cuatro patitas*

## RESUMEN

El extremo sur de la Patagonia representa una región de gran interés científico para el estudio del cambio climático y la respuesta de los ecosistemas, ya que al constituir la única masa continental ubicada entre los 47° y 55°S, constituye un laboratorio natural único a escala regional y hemisférica. Sin embargo, la escasez de estaciones meteorológicas y la falta de registros climáticos continuos dificultan el monitoreo climático sostenido en el tiempo. Asimismo, los estudios ecológicos extensos en la zona han sido limitados por razones históricas y logísticas. Una alternativa para suplir estas limitaciones es el uso de fuentes paleoambientales, como los anillos de crecimiento arbóreo. En este estudio se desarrolló y robusteció una cronología de ancho de anillos de *Nothofagus betuloides* en las cercanías del lago Fagnano, en la Isla Grande de Tierra del Fuego (región de Magallanes, Chile), con el objetivo de evaluar la influencia de la temperatura, la precipitación y la Oscilación Antártica (AAO) sobre el crecimiento radial de esta especie.

La cronología fue construida a partir de 79 series de árboles, las que fueron medidas, cofechadas y estandarizadas, cubriendo el período 1680–2023. Posteriormente, la integración de nuevas mediciones con una cronología previamente desarrollada en el mismo sitio, permitió extender el registro hasta 1577, obteniendo una serie más representativa y consistente para el análisis climático de largo plazo. Los resultados mostraron correlaciones negativas significativas entre el crecimiento radial y las temperaturas de invierno y primavera temprana, así como con las fases positivas de la AAO, lo que indicó que los aumentos de temperatura y el déficit hídrico asociado restringieron el crecimiento de la especie.

Este estudio fortaleció el conocimiento dendroclimático del extremo austral de Sudamérica y confirmó el valor de *N.betuloides* como indicador sensible de la variabilidad climática y de los cambios ambientales en los bosques subantárticos.

**Palabras claves:** *Nothofagus betuloides*, clima, dendrocronología, Tierra del Fuego, variabilidad climática.

## 1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las regiones del mundo están siendo afectadas por el cambio climático, principalmente debido al incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos. Las proyecciones indican que, en las próximas décadas, estos eventos serán más severos y frecuentes, con las regiones de latitudes altas experimentando cambios particularmente rápidos. (IPCC 2021). Asimismo, el aumento sostenido de la temperatura registrado en las últimas décadas no tiene precedentes en al menos los últimos 400 años (Aravena et al., 2002; Villalba et al. 2003)

En este contexto, el extremo sur de la Patagonia adquiere un particular interés científico, ya que es la única masa continental entre los 47° y 55°S. Esta característica la convierte en una región clave para el estudio de la variabilidad climática en el hemisferio (Boninsegna et al. 2009, Villalba et al. 2009). Sin embargo, pese al rol crítico que presenta Sudamérica austral en la comprensión del cambio climático, las estaciones de monitoreo meteorológico son escasas y a menudo tienen series cortas de tiempo con frecuentes lagunas de datos. (Aravena and Luckman 2009, Garreaud et al. 2009, 2013, Lara et al. 2000). Estas limitaciones dificultan la caracterización del clima actual a escala regional, lo que enfatiza la necesidad de contar con nuevos registros de largo plazo que permitan el análisis de la variabilidad climática y su impacto sobre los ecosistemas locales (Villalba et al. 2009, Griebinger et al. 2018).

Ante esta limitación, las variaciones climáticas del pasado no sólo se pueden reconstruir a través de registros meteorológicos, sino también por medio de registros indirectos. Uno de estos corresponde a las reconstrucciones paleoclimáticas desarrolladas a partir de cronologías de ancho de anillos de árboles. Esta ciencia específica es conocida como dendroclimatología, la cual se inserta en una disciplina más general llamada dendrocronología. Esta última estudia la edad de especies arbóreas y arbustivas leñosas (del griego: *dendros* [árbol], *cronos* [tiempo] y *logos*[estudio]), lo que permite asignar fechas precisas a eventos ambientales relevantes (Fritts 1976). Las cronologías de anillos de árboles, por su parte, proporcionan registros climáticos de alta resolución.

Las condiciones ambientales anuales se reflejan en los anillos de crecimiento dependiendo de la sensibilidad específica de cada especie. Por ejemplo, períodos de temperaturas extremas altas pueden resultar en anillos más pequeños debido a un menor crecimiento, mientras que condiciones de escases hídrica pueden provocar anillos más delgados por una reducción en la disponibilidad de agua (Sarris et al. 2011). Esta relación entre el clima y los anillos de los árboles no solo proporciona una ventana al pasado climático, sino que también ayuda a prever cómo los ecosistemas forestales pueden responder a futuros cambios climáticos y eventos extremos (Amoroso et al. 2015).

En trabajos dendroclimáticos, la selección del sitio de estudio es un aspecto clave: los lugares situados a mayor altitud o en los límites de distribución de las especies suelen ser más sensibles a las fluctuaciones climáticas, lo que genera registros más representativos de las condiciones ambientales (Iverson et al. 2004, Hampe y Petit, 2005, Bigler and Bugmann 2018;). De igual forma, áreas escasamente intervenidas por el ser humano, como los andes patagónicos en América del Sur, ofrecen condiciones óptimas para obtener señales climáticas precisas (Lara et al. 2001, Villalba et al. 2003).

En el extremo austral de América del Sur (51°-55° S), las especies *Nothofagus pumilio* y *Nothofagus betuloides* son las especies dominantes en los bosques templados (Donoso 1981), y han sido ampliamente utilizadas como especies indicadoras para el monitoreo de la variabilidad climática y los efectos del cambio climático regional. (Villalba et al. 2012, Fuentes et al. 2018, Soto-Rogel et al. 2022)

*N. betuloides* destaca por su longevidad, pudiendo superar los 600 años (Gutiérrez et al. 1991). Esta característica, junto con su amplia distribución geográfica y las condiciones favorables para la preservación de su madera, la convierten en una especie de particular interés para el desarrollo de estudios dendrocronológicos de largo plazo (Roig y Villalba 2008).

Un factor determinante en el clima de esta región es la Oscilación Antártica (AAO), también denominada Modo Anular del Sur (SAM, por sus siglas en inglés). Este es el principal modo de variabilidad atmosférica en el hemisferio al sur de los 40°S (Gong & Wang 1999, Marshall 2003). Este patrón de circulación se define por la diferencia de presión a nivel del mar entre los 40°S y los 65°S, alternando entre fases positivas y negativas que generan efectos opuestos en la Antártida y las latitudes medias del hemisferio sur. Durante la fase positiva, predominan anomalías de presión negativas en altas latitudes (~65°S) y positivas en latitudes medias (~45°S), lo que desplaza los vientos del oeste hacia el polo, generando condiciones más cálidas y secas sobre el sur de América del Sur (Gillett, Kell & Jones 2006). Esta fase positiva ha mostrado una tendencia sostenida durante los últimos cincuenta años (Garreaud et al. 2009).

En el sector centro-oriental del sur de Sudamérica, estas tendencias positivas observadas de la AAO han sido vinculadas con alteraciones climáticas importantes, tales como la disminución de precipitaciones, el incremento de las temperaturas y el aumento de la frecuencia de sequías (González-Reyes et al. 2017, Soto-Rogel et al. 2020).

Estas dinámicas atmosféricas interactúan con la compleja geografía de la Isla Grande de Tierra del Fuego, la cual presenta un marcado gradiente ecoclimático que se extiende desde ambientes hiperhúmedos en el oeste hasta áreas de estepa árida en el este. Tal gradiente genera respuestas diferenciadas en el crecimiento de los bosques de *N. betuloides*, influenciadas por factores locales como la disponibilidad hídrica y las características particulares de cada micrositio (Soto-Rogel & Aravena 2017, Fuentes et al. 2018, Marshall 2023).

En concordancia con lo interior, diversas investigaciones han documentado una disminución abrupta en el crecimiento de los bosques de *N. betuloides* en el sector oriental de Tierra del Fuego, bajo condiciones de ecotono estepa-bosque (54°S, ~600 mm de precipitación anual), desde fines de la década de 1980, asociada a la fase positiva de AAO (Llancabure 2011, Villalba et al. 2012). En contraste, en las zonas más húmedas de la isla (54°S, ~3000 mm de precipitación anual), la especie no presenta disminuciones de crecimiento considerables, lo que confirma el papel modulador del agua en la respuesta de estos bosques (Soto-Rogel & Aravena 2017)

Bajo este contexto, el objetivo principal del presente estudio es determinar los patrones de crecimiento radial de *N. betuloides* durante los últimos 300 años en un sitio ubicado en el Lago Fagnano, y sus relaciones con la variabilidad climática local y de gran escala. Para el cumplimiento del objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

### **1.1 Objetivos específicos**

- a) Construir una nueva cronología de anchos de anillos para la especie en las cercanías del Lago Fagnano, y actualizar y robustecer la cronología existente en el área de estudio.
- b) Describir los patrones de crecimiento de *Nothofagus betuloides* a escala anual durante los últimos tres siglos.
- c) Evaluar la relación entre el crecimiento radial de *N. betuloides* y variables climáticas locales (precipitación y temperatura) y de gran escala (AAO y presiones).

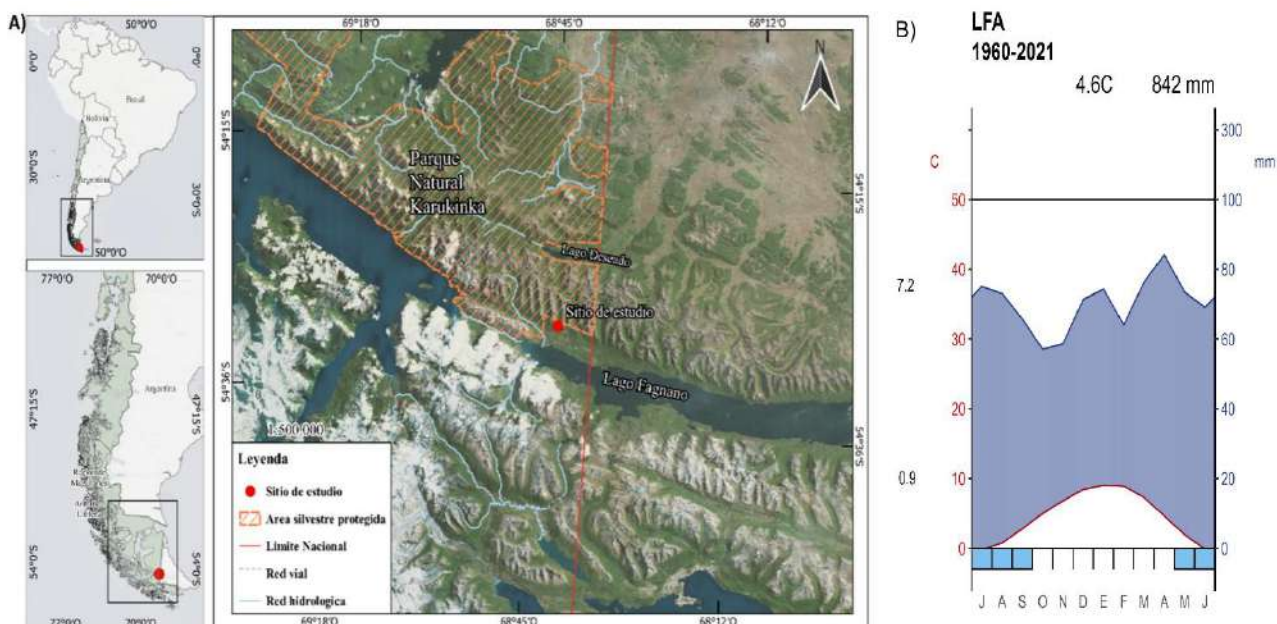
## 2. MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio (figura 1) se localiza en las proximidades del Lago Fagnano (también conocido como Lago Cami), en el sector centro-sur de la Isla Grande de Tierra del Fuego, en la comuna de Timaukel, provincia de Tierra del Fuego, Región de Magallanes, Chile. Presenta un desarrollo de su eje principal en dirección este-oeste, con una longitud aproximada de 104 kilómetros. Su superficie alcanza los 590km<sup>2</sup> (Iturraspe 2011), de los cuales aproximadamente el 93% corresponde a territorio argentino y el 7% restante a territorio chileno, donde se ubica su desembocadura.

El sitio de muestreo (figura 2) se sitúa a tres kilómetros al norte de Lago Fagnano, en el costado occidental de la ruta Y-85. Las coordenadas son 54°28'S y 68°42'O, a una altitud de 370 metros sobre el nivel del mar, en una ladera con exposición sureste.

Desde el punto de vista climático, la zona se clasifica como clima de tundra (CT), según la clasificación de Köppen-Geiger (1936). Las condiciones meteorológicas se caracterizan por una precipitación media anual registrada es de 842 milímetros y una temperatura media anual de 4,6°C (Boisier 2023).



**Figura 1.** (A) Ubicación geográfica del área de estudio en las cercanías de Lago Fagnano. (B) Temperatura media y precipitación anual acumulada en diagrama de Walter-Lieth durante el periodo 1960-2021. En base a datos obtenidos desde CR2MET2.0 (Boisier 2023).

Respecto a la vegetación de la zona, esta forma parte del piso vegetacional Bosque mixto templado-antiboreal andino de *Nothofagus betuloides*-*Nothofagus pumilio*. (Luebert & Pliscoff 2017). Este piso se caracteriza por la codominancia de los árboles *N.betuloides*, de follaje siempreverde, y *N.pumilio*, de carácter caducifolio.

En el estrato inferior, se observa la presencia localmente abundante de *Drimys winteri* y *Maytenus magellanica*, lo que refuerza el carácter mixto de estos bosques, donde conviven especies de diferentes hábitos fenológicos. El estrato arbustivo está generalmente dominado por *Berberis ilicifolia* y *Gaultheria mucronata*, con presencia ocasional de *Lebetanthus myrsinites*. Por su parte, el estrato herbáceo incluye una diversidad de especies como *Acaena ovalifolia*, *Asplenium dareoides*, *Gunnera magellanica*, *Hymenophyllum tortuosum*, *Luzuriaga marginata*, *Senecio acanthifolius*, entre otras.

Este piso de vegetación representa una zona de transición entre los bosques caducifolios de *N.pumilio*, presentes más al este, y los bosques siempreverdes dominados por *N. betuloides*, que se desarrollan hacia el oeste.



**Figura 2.** Sitio de estudio en las cercanías del Lago Fagnano, ubicado en una ladera con exposición sureste a 370 msnm. (Fuente: Felipe Flores)

## **2.2. Recolección muestral**

Las muestras fueron recolectadas por integrantes del Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile durante una campaña de terreno realizada en enero de 2025 en el sitio de estudio. Se obtuvieron 99 testigos de madera de individuos vivos, correspondientes a 49 árboles. Para el muestreo se seleccionaron visualmente individuos dominantes, priorizando aquellos de mayor diámetro y buen estado sanitario.

A las muestras colectadas se les asignó la codificación “LFA”, correspondiente a la abreviatura del sitio de muestreo Lago Fagnano, seguida del número asignado a cada árbol y del radio correspondiente (A, B o C).

Posteriormente, ya en las dependencias del laboratorio, las muestras fueron almacenadas bajo sombra a temperatura ambiente, permitiendo un secado progresivo y controlado. Este procedimiento evitó la exposición directa a la luz solar y minimizó el riesgo de fracturas en los testigos de madera.

## **2.3. Procesamiento de muestras**

Las muestras fueron preparadas siguiendo las técnicas dendrocronológicas descritas por Stokes y Smiley (1968). Inicialmente, los testigos de madera fueron adheridos con pegamento a molduras rectangulares acanaladas de extremo a extremo, con el objetivo de evitar la pérdida de fragmentos y conservar su integridad durante los procesos posteriores. Luego se procedió al pulido de las muestras, el cual se llevó a cabo en la Xiloteca de la Universidad Austral de Chile. Para ello, se utilizó una lijadora de banda con seis lijas de granulometría creciente, comenzando con la más gruesa (120 granos/cm<sup>2</sup>) hasta la más fina (500 granos/cm<sup>2</sup>). Este paso resulta fundamental, ya que un pulido adecuado permite obtener superficies lisas y sin imperfecciones, facilitando así la correcta visualización de las estructuras anatómicas que definen los límites de los anillos de crecimiento (Stokes y Smiley 1968).

Una vez completado el procesamiento, las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile, donde se asignaron los años calendario a los anillos, siguiendo la metodología descrita por Stokes y Smiley (1968). El fechado visual se realizó utilizando una lupa estereoscópica (60X), trabajando desde la corteza hacia la médula. A cada anillo se le asignó el año calendario correspondiente al inicio de la formación del leño, siguiendo la convención adoptada para el hemisferio sur (Schulman 1956). La medición de los anillos se llevó a cabo mediante un carro de medición Velmex (Bloomfield, USA), con una precisión de 0,001 mm.

Este equipo se desplaza manualmente desde el inicio hasta el final de cada anillo, definidos visualmente con ayuda de la lupa estereoscópica. Los valores obtenidos, que representan el crecimiento radial anual en milímetros, fueron almacenados automáticamente mediante el programa de medición en archivos de texto (Holmes 1983).

Para verificar la calidad del fechado visual y la precisión de las mediciones, se empleó el programa COFECHA (Holmes 1983). Asimismo, se utilizó el programa EDRM (Edit Ring Measurements; Holmes 1999) para revisar y corregir las mediciones cuando fue necesario. Ambos programas forman parte de la librería de programas dendrocronológicos DPL (Dendrochronology Program Library; Holmes 1999). A través de COFECHA se obtuvieron también varios estadísticos: el coeficiente de autocorrelación (que evalúa la influencia del crecimiento del año anterior sobre el actual), la sensibilidad media (que mide la variación relativa entre anillos consecutivos) y la intercorrelación entre las distintas series (Holmes 1983).

#### **2.4. Desarrollo de cronología de ancho de anillos**

Con las series de anillos seleccionadas y cofechadas, se elaboraron las cronologías de crecimiento radial utilizando el paquete para análisis dendrocronológicos “dplR” (Bunn 2008) en el lenguaje estadístico R (R Core Team 2024). Este software permitió transformar los datos de medición en información estadística, además de generar diversos gráficos relacionados con el crecimiento radial. A través de su uso, se obtuvieron los estadísticos básicos y representaciones gráficas de las series de crecimiento.

Se desarrollaron cuatro tipos de cronologías de anillos. La cronología RAW representa el promedio del crecimiento radial sin aplicar ningún tipo de ajuste o estandarización. Posteriormente, se elaboraron dos cronologías estándar (RWI). La primera fue ajustada a una curva exponencial negativa, mientras que la segunda se generó mediante el método de *median smoothing*. Para esta última estandarización se utilizó el software ARSTAN (Cook & Holmes 1999), aplicando una ventana temporal equivalente al 50% de la longitud total de cada serie. Ambos procedimientos buscan reducir los efectos no climáticos asociados a la edad del árbol o a cambios en su geometría, preservando al mismo tiempo la variabilidad de baja frecuencia. Las series resultantes presentan una media igual a 1 y una varianza relativamente homogénea a lo largo del tiempo (Fritts 1976).

Finalmente, el software ARSTAN también permitió construir una cronología residual a partir de los residuos del modelo de autorregresión aplicado a las series estandarizadas. Esta cronología elimina la autocorrelación, es decir, la correlación entre el ancho de anillo de un año determinado y los años posteriores, presentando una uniformidad similar en la varianza a lo largo del tiempo.

Posteriormente, se evaluó la robustez de las cronologías mediante el uso del software ARSTAN, utilizando el índice de la Señal de Población Expresada (EPS, por sus siglas en inglés). Este índice mide la fuerza de la señal común contenida en una cronología y representa la similitud entre dicha cronología y una hipotética que se replica infinitamente a partir de las series individuales incluidas en la cronología de estudio para un intervalo común (Cook 1985)

El EPS se calculó utilizando una ventana móvil de 50 años, con un traslape de 25 años, con el objetivo de evaluar la estabilidad de la señal común en las cronologías (Briffa & Jones 1990). Según lo propuesto por Wigley et al. (1984), se considera que una cronología alcanza un nivel significativo de robustez cuando el valor del EPS supera el umbral de 0,85. Por lo tanto, en este estudio, los análisis de cronologías de anchos de anillos y de los patrones de crecimiento se enfocaron a partir del año en que se alcanzó dicho valor.

## **2.5. Análisis de patrones de crecimiento**

Para determinar los patrones temporales de crecimiento radial de *Nothofagus betuloides*, se aplicaron análisis espectrales y de series de tiempo con el fin de identificar oscilaciones significativas presentes en las cronologías. En primer lugar, se utilizó el método espectral multi-taper (MTM; Lees & Park 1995) mediante el paquete estadístico “dplR” (Bunn 2008) en el software R (R Core Team 2024), con el propósito de detectar los ciclos dominantes de variabilidad en las cronologías estándar obtenidas. Posteriormente, se aplicó una Transformada Wavelet Continua (CWT) implementada a través del paquete “biwavelet” (Gouhier et al. 2016), la cual permite representar simultáneamente los modos dominantes de variabilidad y su evolución temporal, identificando periodos de oscilación persistentes y episodios de cambio abrupto en la señal dendrocronológica. De manera complementaria, se realizó una Descomposición Multiresolución (MRA) con el objetivo de separar la serie en componentes de distinta frecuencia, distinguiendo las fluctuaciones de alta frecuencia (interanuales) y baja frecuencia (decadales e interdecadales), permitiendo así analizar la estructura jerárquica de la variabilidad del crecimiento radial. La combinación de estos métodos —MTM, CWT y MRA— permitió caracterizar los patrones de variabilidad temporal en distintas escalas y evaluar la estabilidad y significancia de las oscilaciones a lo largo del período analizado.

## 2.6. Análisis de correlación entre cronologías y variables climáticas

Dado que la región de estudio presenta una baja densidad de estaciones meteorológicas y registros climáticos con cobertura limitada, se utilizaron datos de reanálisis para establecer las relaciones entre las variaciones climáticas y las cronologías de ancho de anillo. El conjunto de datos empleado corresponde al producto grillado CR2MET v2.0, el cual proporciona información sobre precipitación total (tp), temperatura media del aire a 2 metros (t2m), temperatura mínima (tmin) y temperatura máxima (tmax) para el período 1960–2021 (Boisier 2023). Asimismo, se consideró el Índice de Oscilación Antártica en la versión de Marshall (2022) como el principal forzante de gran escala.

Para determinar la magnitud de estas relaciones clima-crecimiento, se realizaron análisis de correlación de Pearson entre las cronologías y las variables climáticas mencionadas, utilizando el software R (R Core Team 2024). Considerando que el crecimiento radial puede estar condicionado tanto por el clima actual como por el del año anterior a la formación del anillo (Fritts 1976), se generaron predictores climáticos estacionales mediante el uso de ventanas móviles de 1 a 12 meses de duración, dentro de un intervalo total de 24 meses, que abarca desde mayo del año previo hasta abril del año en curso correspondiente a la temporada de crecimiento.

Los datos contenidos en cada ventana se agregaron según el tipo de variable: por suma para la precipitación, por promedio para las temperaturas (t2m, tmin, tmax), y el índice AAO. Lo cual permitió identificar los periodos climáticos más influyentes sobre el crecimiento radial en el sitio de estudio. De manera complementaria, se seleccionaron los periodos donde se presentó una mayor correlación entre las variables climáticas con la cronología correspondiente y se generó una serie de tiempo entre estos, las cuales fueron transformadas a anomalía normalizada, con el fin de que sean visualmente comparables.

Por último, con el objetivo de analizar espacialmente los patrones de circulación atmosférica asociados al crecimiento de *N. betuloides*, se calculó un mapa de correlación espacial entre la cronología estándar y la altura geopotencial de 850 hPa. Para ello se utilizaron los promedios mensuales grillados con una resolución de 2.5° x 2.5° provenientes del reanálisis del Centro Nacional de Predicción Ambiental y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP-NCAR) (Kalnay et al. 1996), permitiendo identificar las estructuras de presión atmosférica dominantes que modulan el crecimiento en el área de estudio.

## 2.7. Enfoque analítico

Cabe destacar que, dado que uno de los objetivos específicos de este estudio fue actualizar y robustecer la cronología existente en el sitio de Lago Fagnano, originalmente desarrollada por el laboratorio de Dendrocronología y Cambio global de la Universidad Austral de Chile en el año 2005 y presentada en la publicación de Villalba et al. (2012), el proceso de construcción de la cronología de anchos de anillos se llevó a cabo en dos etapas. En primer lugar, se desarrolló una nueva cronología a partir de las series obtenidas el 2025, y posteriormente se integraron con las series de la cronología ya existente, generando una versión actualizada y más representativa del registro dendrocronológico del sitio.

El análisis principal se centró en la cronología estándar con *median smoothing*, ya que este enfoque representa una innovación metodológica dentro del estudio y permite capturar de mejor manera la señal común del crecimiento radial. Las demás cronologías fueron empleadas con fines comparativos y de verificación de consistencia, presentando los análisis asociados como material suplementario.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Construcción de nueva cronología de ancho de anillos en Lago Fagnano

La nueva cronología de *Nothofagus betuloides* en Lago Fagnano se desarrolló a partir de 42 de los 49 árboles muestreados. De un total de 99 series obtenidas, se seleccionaron 79 (79,8%) basándose en sus valores significativos de intercorrelación. Las series y árboles restantes fueron descartados debido a problemas físicos en los tarugos que imposibilitaron su medición o a la falta de cofechado con la cronología maestra. La cronología resultante presenta una extensión temporal de 343 años, abarcando el período comprendido entre 1680 y 2023, con un total de 17.871 anillos medidos.

Como se observa en el cuadro 1 (cronologías nuevas), las series muestra una intercorrelación significativa y representativa ( $r= 0,545$ ). Respecto a las propiedades estadísticas, las cronologías estándar exhibieron una sensibilidad media de 0,122. La autocorrelación de primer orden se mantuvo elevada, con valores de 0,722 en el ajuste exponencial negativo y 0,714 en *median smoothing*. La variabilidad de las series, expresada en la desviación estándar, alcanzó valores de 0,196 y 0,203 respectivamente. El análisis de la robustez de la señal indicó que el EPS superó el umbral de 0,85 en el año 1765, asegurando la representatividad de la muestra desde esa fecha en adelante.

**Cuadro 1.** Estadísticos descriptivos comparativos de las cronologías de ancho de anillos estándar de *Nothofagus betuloides* en Lago Fagnano. Se presentan los valores del nuevo muestreo (79 series) y de la cronología final robustecida (137 series)

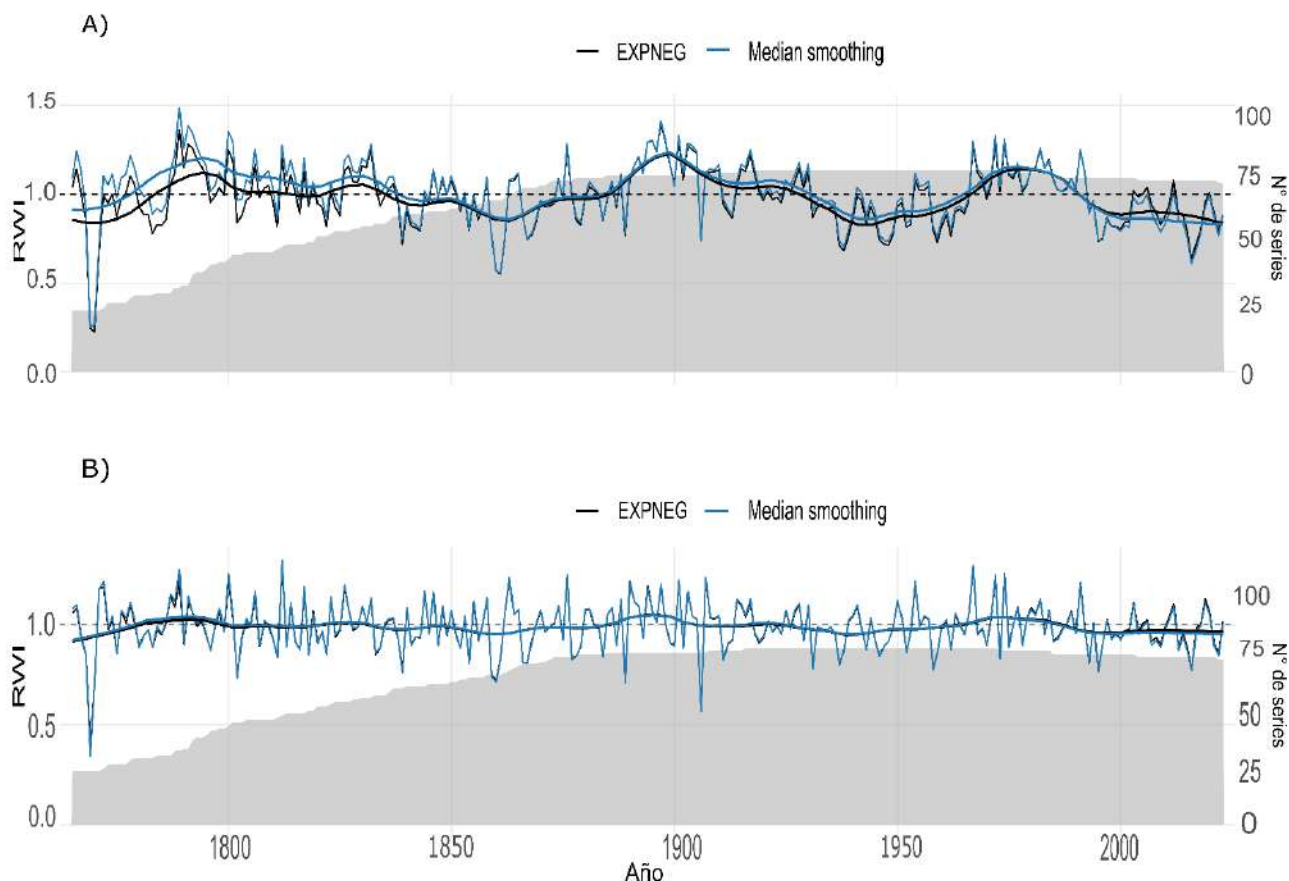
| <b>Variable</b>                   | <b>Cronología nueva (Exp. negativa)</b> | <b>Cronología nueva (<i>Median smoothing</i>)</b> | <b>Cronología robustecida (Exp. Negativa)</b> | <b>Cronología robustecida (<i>Median smoothing</i>)</b> |
|-----------------------------------|---|---|---|---|
| <b>Numero de series</b>           | 79                                      | 79  | 137   | 137   |
| <b>Número de individuos</b>       | 42                                      | 42  | 67  | 67  |
| <b>Número total de anillos</b>    | 17.871                                  | 17.871  | 32.427  | 32.427  |
| <b>Período de tiempo</b>          | 1680-2023                               | 1680-2023   | 1577-2023                                     | 1577-2023   |
| <b>Intercorrelación de series</b> | 0,545                                   | 0,545   | 0,534   | 0,534   |
| <b>Sensibilidad media</b>         | 0,122                                   | 0,122   | 0,130   | 0,130   |
| <b>EPS (&gt; 0.85)</b>            | 1765                                    | 1765  | 1680  | 1680  |
| <b>Autocorrelación 1er orden</b>  | 0,722                                   | 0,714   | 0,807   | 0,820   |
| <b>Desviación estándar</b>        | 0,196                                   | 0,203   | 0,225   | 0,239   |

Las cronologías estándar muestran una señal coherente a lo largo del período 1765–2023 (Figura 3), aunque con diferencias en la expresión de los extremos. Los anillos más pequeños se registraron en 1770 para la cronología estándar con exponencial negativa ( $RWI = 0,225$ ) y en 1769 para la estandarizada con *median smoothing* (0,251). En contraste, los años con anillos más grandes se presentaron en 1789 y 1897 para las cronologías estándar, alcanzando valores máximos de 1,488 y 1,395.

Los periodos prolongados de crecimiento por sobre la media se identificaron principalmente en los intervalos 1787–1795, 1826–1833, 1890–1905, 1914–1919, 1925–1930 y 1971–1992. En contraste, los periodos prolongados bajo la media se observaron en 1838–1843, 1866–1873, 1931–1940, 1943–1953, 1958–1966, 1993–2002, 2007–2011 y 2013–2019.

La profundidad de series aumentó progresivamente desde 24 en 1765 hasta alcanzar un máximo de 79 en 1916, manteniéndose en valores elevados durante gran parte del siglo XX, con 77 series en

1900 y 76 en 2000, para descender a 75 en 2020. Esto refleja que los segmentos más recientes de la cronología cuentan con una mayor robustez y representatividad en comparación con los tramos iniciales.



**Figura 3.** Nuevas cronologías de ancho de anillos (RWI) obtenidas para *Nothofagus betuloides* en el sitio de estudio durante el período común 1765–2023. A) Cronología estándar. B) Cronología residual. Se muestran las cronologías estandarizadas mediante dos métodos: exponencial negativa (color negro) y *median smoothing* (color celeste). Las líneas suavizadas de mayor grosor corresponden a un *spline* de 40 años. El área gris indica el número de series utilizadas en cada año, mientras que la línea discontinua negra representa el valor medio de los índices.

### 3.2. Actualización y robustecimiento de la cronología de ancho de anillos en Lago Fagnano

La cronología ampliada de *Nothofagus betuloides*, que integra tanto las series obtenidas en la campaña reciente como aquellas recolectadas en estudios previos, se extiende desde 1577 hasta 2023, con una longitud total de 446 años. En total se consolidaron 137 series correspondientes a 67

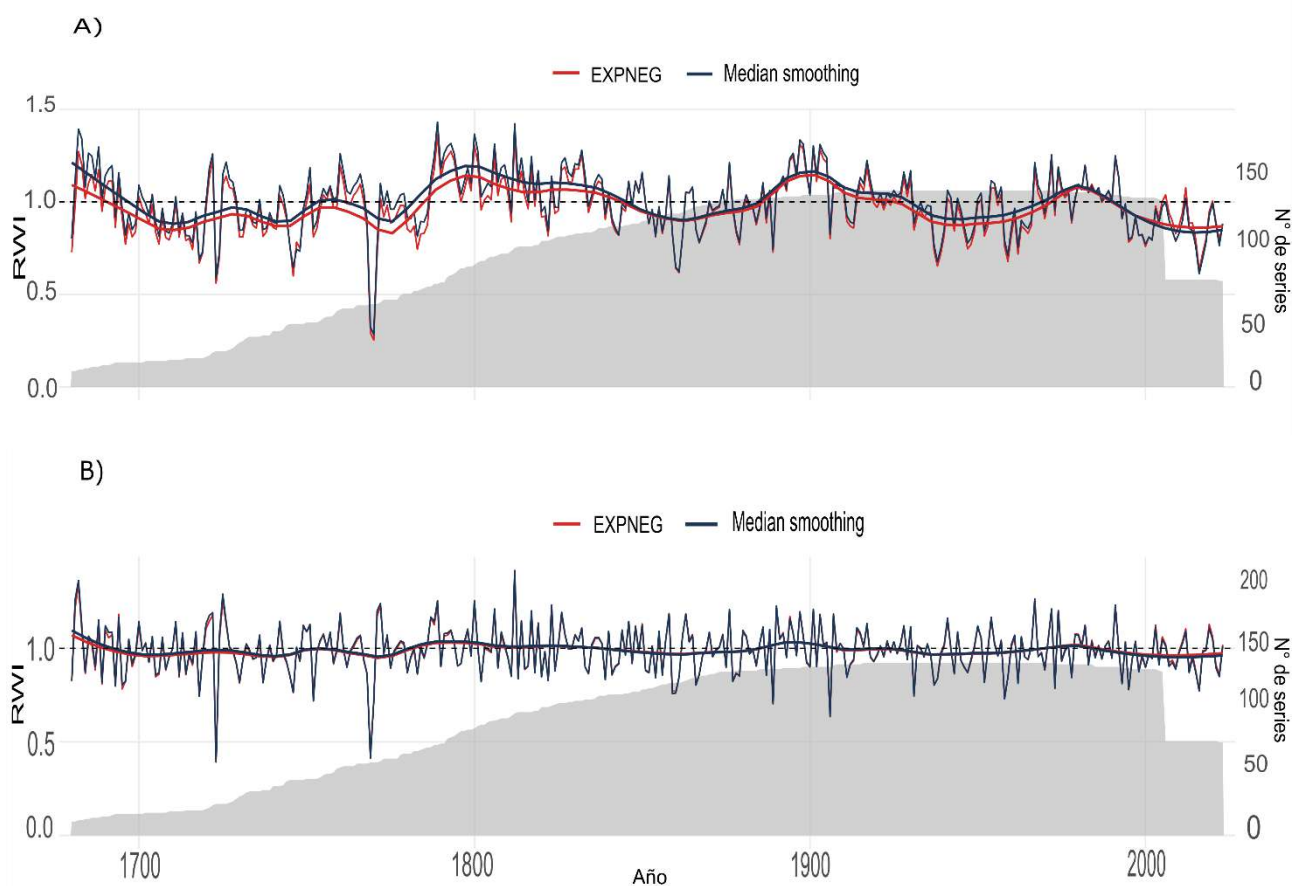
individuos. De este conjunto, 79 series (42 árboles) provienen del muestreo del presente estudio, mientras que las 58 series restantes (25 árboles) corresponden a datos de la campaña previa, acumulando un total de 32.427 anillos medidos.

Al observar las columnas correspondientes en el cuadro 1, se evidencia el impacto de la integración de datos. Si bien la intercorrelación promedio se mantuvo estable en 0,534, reflejando consistencia interna, el resultado más destacado es la mejora en la Señal de Población Expresada (EPS): al integrar los datos históricos, el umbral de 0,85 se supera desde el año 1680. Esto permite extender la confiabilidad del registro climático casi un siglo más atrás en comparación con la cronología nueva, cuyo umbral se alcanzaba en 1765.

Los estadísticos descriptivos de esta versión robustecida muestran también una sensibilidad media levemente superior (0,130). Así mismo, la autocorrelación de primer orden aumento considerablemente, alcanzando valores de 0,807 en el ajuste con exponencial negativa y 0,820 en *median smoothing*. Por último, la desviación estándar se situó entre 0,225 y 0,239, indicando que esta cronología conserva una mayor amplitud de las fluctuaciones de crecimiento en comparación con la cronología individual.

Las cronologías robustecidas muestran una señal coherente a lo largo del período 1680–2023, (Figura 4). Los años con anillos más pequeños se registraron en 1770 con valores de 0,253 en exponencial negativa y 0,283 en *median smoothing*. En contraste, los anillos más grandes se presentaron en 1789 en las cronologías estándar, con valores de 1,362 y 1,431.

Los períodos prolongados de crecimiento por sobre la media se identificaron principalmente en las cronologías estándar, con intervalos como 1682–1688, 1787–1801, 1803–1810, 1826–1833, 1890–1905, 1914–1918 y 1979–1986. En contraste, los períodos prolongados de crecimiento por debajo de la media se observaron en 1695–1699, 1705–1710, 1712–1720, 1730–1735, 1737–1741, 1744–1749, 1780–1786, 1841–1845, 1851–1857, 1931–1940. Sin embargo, resulta de particular relevancia el último intervalo registrado, comprendido entre 1993 y 2023. Durante estas últimas tres décadas, se aprecia una tendencia decreciente sostenida, constituyendo uno de los períodos de bajo crecimiento más extensos y marcados de toda la cronología, con índices que se mantienen consistentemente por debajo de la media histórica hacia el presente.

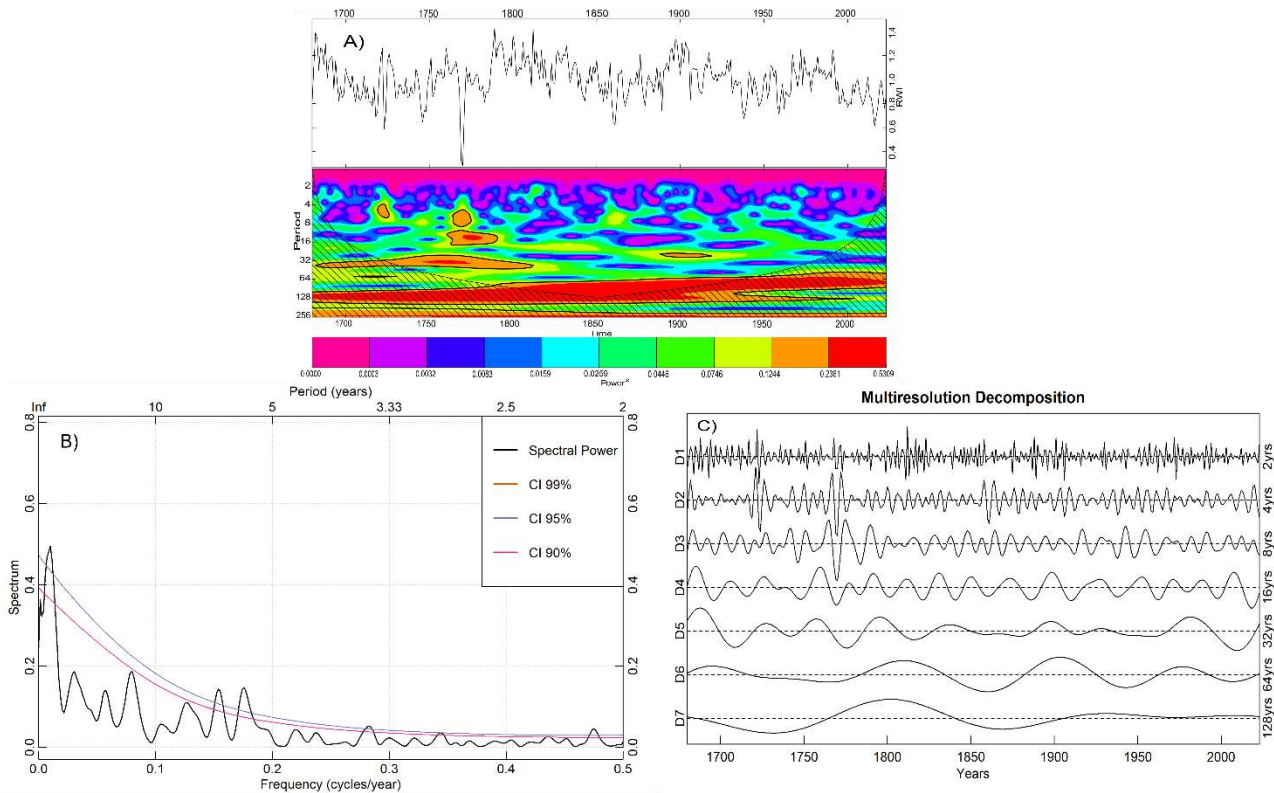


**Figura 4.** Cronologías actualizadas y robustecidas de ancho de anillos (RWI) obtenidas para *Nothofagus betuloides* en el sitio de estudio durante el período común 1680–2023. A) Cronología estándar. B) Cronología residual. Se presentan las cronologías estandarizadas mediante los métodos de exponencial negativa (línea roja) y *median smoothing* (línea azul). Las líneas suavizadas de mayor grosor corresponden a un *spline* de 50 años. El área gris indica el número de series utilizadas en cada año, mientras que la línea discontinua negra representa el valor medio de los índices.

### 3.3. Análisis temporal de variabilidad de patrones de crecimiento en *Nothofagus betuloides*

El análisis espectral y temporal de ambas cronologías estándar muestra resultados coincidentes. El wavelet continuo (Figura 5A) evidencia un bloque principal de varianza significativa centrado en el marcador de 1769–1770, que se extiende entre 1760 y 1785 en escalas intradecadales (< 8 años), decadales (8–16 años) e interdecadales (16–32 años). Un segundo núcleo significativo aparece hacia fines del siglo XIX e inicios del XX ( $\approx$ 1890–1910), delimitado principalmente en las bandas de 8–32 años. El periodograma (Figura 5B) refuerza estos patrones, mostrando picos significativos por sobre los intervalos de confianza en torno a 2–4 años, 8 años y un rango más amplio cercano a 16–32 años,

lo que coincide con las oscilaciones resaltadas en la wavelet. Finalmente, la descomposición multiresolución (Figura 5C) confirma la persistencia de las oscilaciones de alta frecuencia (2–8 años) a lo largo de toda la serie, con mayor amplitud en el intervalo 1760–1785, además de un refuerzo transitorio en el componente de 16–32 años cercano a 1900. En conjunto, ambas cronologías reproducen un patrón consistente, donde predomina la señal vinculada al año marcador y se complementa con un núcleo secundario hacia comienzos del siglo XX, reforzando la coherencia entre metodologías complementarias.

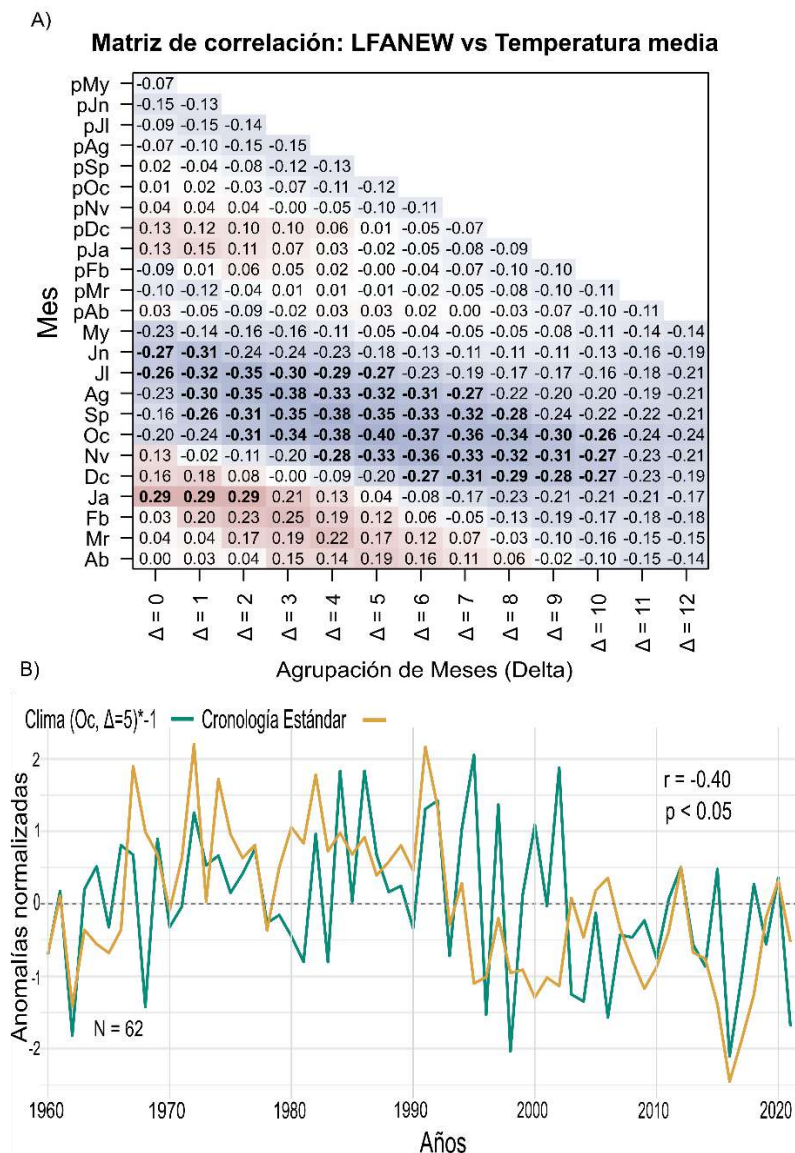


**Figura 5.** Análisis espectral de la cronología estándar con *median smoothing* (A) Wavelet continuo (CWT), donde las áreas encerradas en contornos negros indican varianza significativa a niveles de confianza del 95%. (B) Periodograma de REDFIT, con picos significativos por sobre las líneas de intervalos de confianza que representan las principales periodicidades (en años) de la serie. (C) Descomposición multiresolución (MRA), que muestra los componentes de distinta frecuencia (alta, decadal e interdecadal) a lo largo del período 1680–2023.



### 3.4.2. Correlación entre cronologías de ancho de anillo y temperatura media

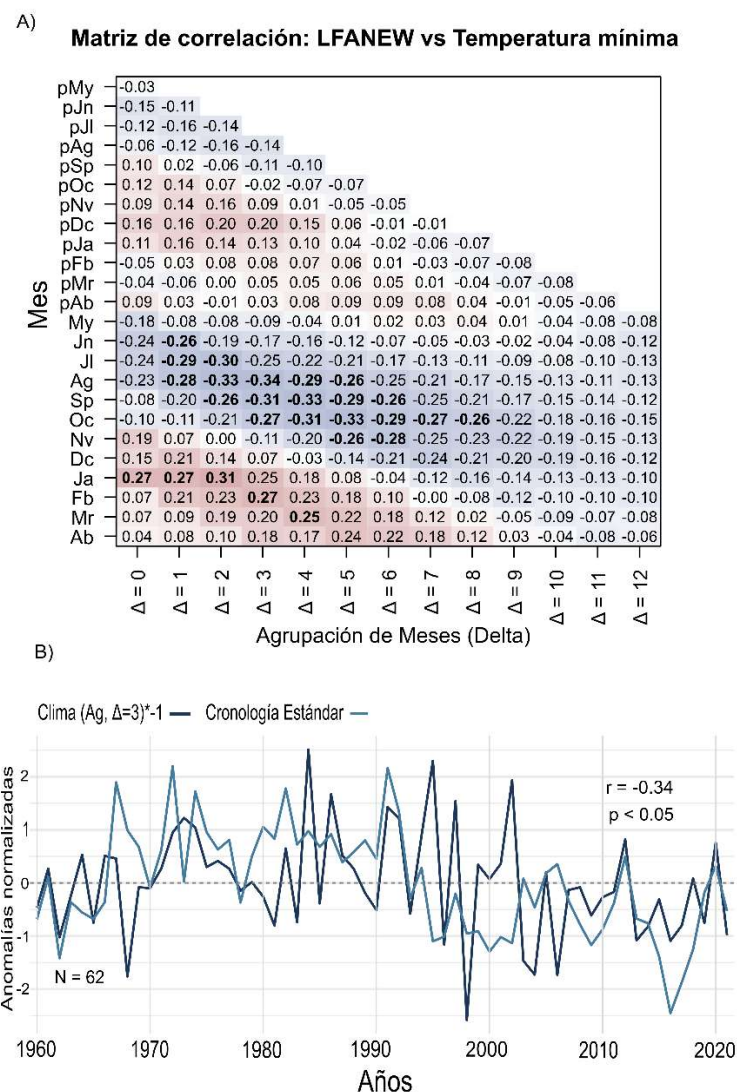
La matriz de correlación (Figura 7A) muestra una correlación negativa significativa en octubre con  $\Delta = 5$  ( $r = -0.40$ ;  $p < 0.05$ ), lo que corresponde al efecto acumulado desde mayo hasta octubre de la temporada de crecimiento actual. Esta misma señal se aprecia en el gráfico de anomalías normalizadas (Figura 7B). En los gráficos de barra (Anexo 2) se destacan correlaciones negativas significativas entre junio y octubre, junto con correlaciones positivas significativas en enero en diferentes cronologías y estandarizaciones.



**Figura 7.** Correlaciones entre la cronología estándar con *median smoothing* de *Nothofagus betuloides* y la temperatura media. A) Matriz de correlación para diferentes combinaciones de meses ( $\Delta$ ). B) Series de anomalías normalizadas la cronología estándar y la temperatura media invertida para una mejor comparación visual.

### 3.4.3. Correlación entre cronología de ancho de anillos y temperatura mínima

En el caso de la temperatura mínima, la matriz de correlación (Figura 8A) muestra una correlación negativa significativa en agosto con  $\Delta = 3$  ( $r = -0.34$ ;  $p < 0.05$ ), correspondiente al periodo acumulado de mayo a agosto de la temporada de crecimiento actual. El gráfico de anomalías normalizadas (Figura 8B) refleja la misma señal. Los gráficos de barra (Anexo 3) muestran resultados adicionales: en la cronología estándar con exponencial negativa aparece una correlación positiva significativa en enero ( $r = 0.31$ ), mientras que en las cronologías residuales se observa también una correlación positiva en enero con valores mayores ( $r = 0.46$  y  $r = 0.45$ ).



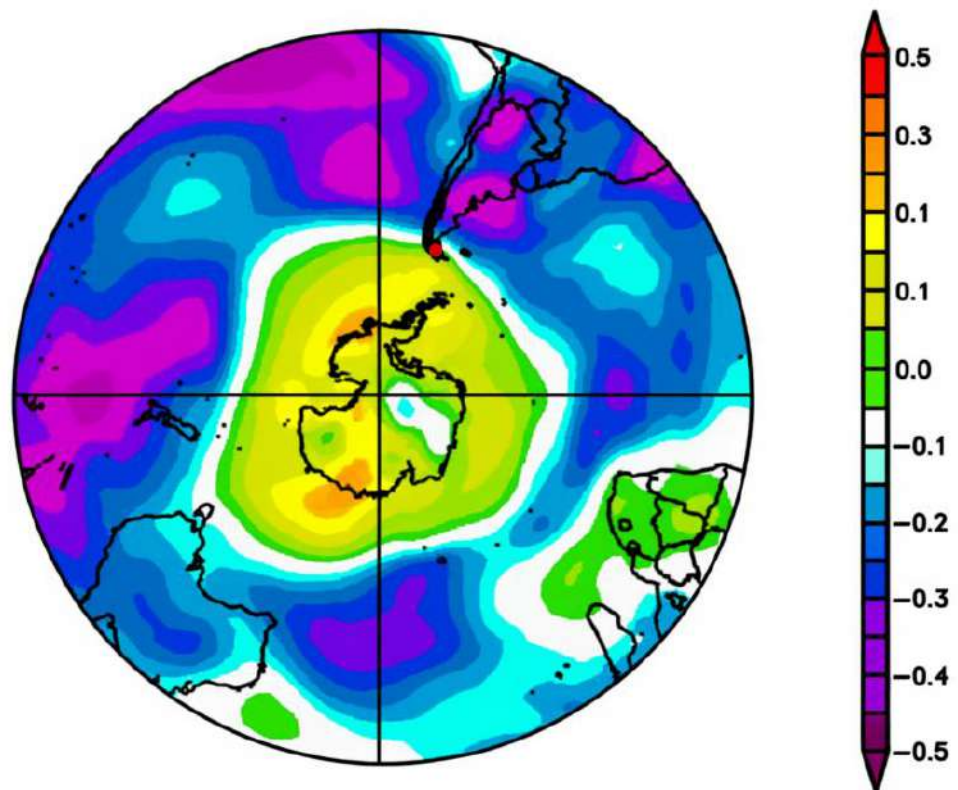
**Figura 8.** Correlaciones entre la cronología estándar con *median smoothing* de *Nothofagus betuloi-* *des* y la temperatura mínima. A) Matriz de correlación para diferentes combinaciones de meses ( $\Delta$ ). B) Series de anomalías normalizadas de la cronología estándar y la temperatura mínima invertida para facilitar la comparación visual.





El análisis de correlación espacial se efectuó considerando el periodo compuesto entre enero de la temporada previa y diciembre de la temporada de crecimiento actual, intervalo seleccionado por registrar la mayor correlación estadística entre la cronología estándar y el índice AAO.

El mapa resultante (Figura 11) exhibe una asociación local débil en el sitio de estudio ( $r \approx 0-0,1$ ;  $p < 0,05$ ). Sin embargo, a escala hemisférica se distingue una estructura de correlación zonal bien definida. Se observan coeficientes positivos concentrados sobre el continente antártico y altas latitudes, los cuales contrastan con un cinturón circumpolar de correlaciones negativas situado en las latitudes medias. Esta configuración espacial, caracterizada por anomalías de presión de signo opuesto entre la zona polar y las latitudes medias, reproduce la estructura característica de la fase negativa de la Oscilación Antártica.



**Figura 11.** Mapa de correlación espacial entre la altura geopotencial de 850 hPa y la cronología estándar de *Nothofagus betuloides* en el sitio Lago Fagnano para el periodo compuesto: enero de la temporada previa y diciembre de la temporada de crecimiento actual (1948–2020). Los colores cálidos indican correlación positiva y los fríos correlación negativa. El punto rojo indica la ubicación del sitio de estudio Los datos provienen del reanálisis NCEP/NCAR.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Cronología de ancho de anillos

La actualización y fortalecimiento de la cronología previamente desarrollada por Villalba et al. (2012) para el sitio Lago Fagnano permitieron construir una serie de referencia más robusta y representativa, posicionándola como una de las cronologías más sólidas elaboradas para la especie en el Sudamérica. En este proceso, la aplicación del método de estandarización *median smoothing*, demostró ser la alternativa más adecuada para conservar las tendencias negativas de crecimiento observadas en las últimas décadas, tal como también documentan Villalba et al. (2012) para la Patagonia austral.

La cronología desarrollada en este estudio incluyó 79 series cofechadas, con una intercorrelación significativa ( $r = 0.545$ ). Posteriormente, al incorporar las series originales de Villalba et al. (2012), se obtuvo una cronología compuesta por 137 series, con una intercorrelación promedio de 0.534. Este valor confirma la coherencia y consistencia de las series integradas, siendo comparable, e incluso superior, a las reportadas en estudios previos para *N. betuloides* en otros sitios del extremo austral (Llancabure 2011, Castellano 2017).

La cronología ampliada de *Nothofagus betuloides* en Lago Fagnano evidencia una alternancia clara entre periodos de crecimiento por sobre y bajo la media, reflejando fases favorables y restrictivas en la productividad radial a lo largo de los últimos siglos. En la versión estándar se observan incrementos destacados entre 1787–1801, 1826–1833, 1890–1905 y 1979–1986, mientras que los periodos prolongados de crecimiento reducido se concentran en 1744–1749, 1841–1845, 1931–1940, 1993–2011 y 2013–2023 (Figura 4A). Dentro de esta variabilidad, los años marcadores 1769–1770 corresponden a los valores mínimos absolutos de la serie, un evento extremo de supresión que también ha sido descrito en otras cronologías de la especie en Tierra del Fuego (Villalba et al. 2012, Soto-Rogel & Aravena 2017, Fuentes et al. 2018).

De igual manera, se observa como la cronología de Lago Fagnano revela una marcada disminución en la tasa de crecimiento desde inicios de la década de 1990, evidenciando la prevalencia de condiciones ambientales limitantes para el desarrollo radial en las últimas tres décadas. Esta anomalía negativa coincide con los patrones detectados en otras cronologías de *N. betuloides* del sur de Chile y Argentina (Llancabure 2011, Villalba et al. 2012, Soto-Rogel et al. 2022), y puede atribuirse a las transformaciones climáticas regionales asociadas a la persistencia de la fase positiva del Modo Anular del Sur (SAM) durante la segunda mitad del siglo XX (Garreaud et al. 2009).

En concordancia con investigaciones anteriores (Llancabure 2011, Villalba et al. 2012, Soto-Rogel & Aravena 2017, Fuentes et al. 2018, Soto-Rogel et al. 2022), los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de generar registros de más de 300 años caracterizados por una señal común robusta. Esta alta sincronía observada entre las series confirma que el crecimiento de los árboles en Lago Fagnano presenta una elevada sensibilidad frente a la variabilidad climática.

## 4.2. Patrones de crecimiento

El análisis espectral y temporal de las cronologías de *Nothofagus betuloides* en Lago Fagnano revela una estructura coherente en la variabilidad del crecimiento radial, con oscilaciones significativas a distintas escalas temporales que reflejan la interacción entre procesos climáticos regionales y de gran escala. El wavelet continuo muestra un bloque dominante de varianza significativa en torno al marcador 1769–1770, extendido entre 1760 y 1785, indicando un evento de fuerte impacto sobre el crecimiento. Este núcleo principal se complementa con un segundo bloque hacia fines del siglo XIX e inicios del XX, lo que evidencia recurrencias en la variabilidad de mediano plazo.

Las oscilaciones intradecadales y decadales (<8 y 8–16 años) reflejan respuestas a forzantes interanuales, mientras que las componentes interdecadales (16–32 años) sugieren la influencia de procesos de baja frecuencia. El periodograma confirma estas periodicidades, con picos significativos entre 2–4, 8 y 16–32 años, y la descomposición multiresolución evidencia la persistencia de oscilaciones de alta frecuencia a lo largo de la serie, con una intensificación entre 1760–1785 y un refuerzo transitorio cercano a 1900.

En conjunto, los resultados indican una señal climática estable y multiescala en el crecimiento de *N. betuloides*, donde confluyen variaciones interanuales, decadales e interdecadales, reflejando la sensibilidad de la especie frente a la variabilidad climática del extremo austral de Sudamérica.

## 4.3. Relación entre crecimiento radial y variables climáticas locales y de gran escala

En el análisis de las correlaciones entre el crecimiento radial de y la variabilidad climática, se identifica una correlación positiva con la precipitación en septiembre del año previo al crecimiento ( $r = 0.30$ ;  $\Delta = 0$ ). Esto sugiere que una mayor disponibilidad hídrica hacia el final del invierno favorece el inicio del crecimiento en la temporada siguiente. Este patrón podría estar asociado a la recarga hídrica del suelo y a la disponibilidad de agua durante la fase de brotación primaveral. Sin embargo,

esta asociación no coincide de manera consistente con estos previos realizados en la región, lo que refuerza la marcada heterogeneidad en la distribución espacial de las precipitaciones en la Patagonia austral, así como la variabilidad de las correlaciones entre crecimiento y precipitación según las condiciones locales de cada micrositio (Soto-Rogel & Aravena 2017, Fuentes et al. 2018).

El crecimiento de *Nothofagus betuloides* en el sitio de estudio muestra una correlación negativa significativa con las temperaturas del otoño tardío, invierno y primavera temprana (mayo a octubre) de la temporada de crecimiento actual. Este patrón concuerda con investigaciones previas y puede explicarse por diversos mecanismos. Por una parte, las temperaturas invernales más cálidas pueden inducir un deshielo prematuro, reduciendo la disponibilidad hídrica durante el período de crecimiento, efecto que se intensifica en sitios más secos (Llancabure 2011, Soto-Rogel & Aravena 2017). Asimismo, inviernos templados pueden provocar una brotación anticipada, incrementando el riesgo de los árboles a daños por heladas o granizos durante irrupciones de aire frío (Boninsegna et al. 1989, Fuentes et al. 2018). De igual modo, Llancabure (2011) plantea que el aumento sostenido de las temperaturas durante las últimas décadas intensifica la demanda evaporativa y la evapotranspiración, generando un déficit hídrico durante el período de crecimiento de *N. betuloides*.

Respecto a la AAO, se observó una correlación negativa y significativa acumulada entre enero de la temporada previa y diciembre de la temporada de crecimiento actual. Esto indica que la fase positiva de AAO tiende a generar un crecimiento por debajo del promedio de los anillos. Este resultado, coincidente con lo reportado por Villalba et al. (2012) para el mismo periodo, puede explicarse por el déficit hídrico generado durante la temporada de crecimiento, producto de una menor disponibilidad de agua y del aumento sostenido de las temperaturas en las últimas décadas. Estudios previos han documentado consistentemente esta relación inversa entre la fase positiva de AAO y el crecimiento radial de *N. betuloides* y otras especies del género *Nothofagus* en el sur de Chile, reafirmando el papel de la AAO como uno de los forzantes climáticos más influyentes en los ecosistemas subantárticos (Llancabure 2011, Fuentes et al. 2018, Soto-Rogel et al. 2022). Esta señal también se evidencia en el mapa de correlación entre la altura geopotencial de 850 hPa y la cronología estándar (Figura 11), La interpretación física de este patrón indica que el crecimiento radial se ve favorecido bajo una configuración atmosférica asociada a la fase negativa de la AAO, caracterizada por altas presiones sobre la Antártica y bajas presiones en latitudes medias. Bajo este escenario, el cinturón de los vientos del Oeste (*Westerlies*) se desplaza hacia el norte y se debilita en las altas latitudes, permitiendo un mayor ingreso de sistemas frontales y precipitaciones hacia la zona de Tierra del Fuego (Garreaud et al. 2009). En conjunto, estos resultados confirman la sensibilidad de *N. betuloides* a la variabilidad del Modo Anular del Sur y su influencia sobre el hidroclima de la Patagonia austral.

## 5. CONCLUSIONES

El presente estudio contribuye al conocimiento dendroclimático del extremo austral de Sudamérica mediante la consolidación de una cronología extensa y coherente de *Nothofagus betuloides* para el sector de Lago Fagnano, una de las más completas desarrolladas para la especie. La aplicación del método de estandarización mediante *median smoothing* permitió preservar adecuadamente las tendencias de baja frecuencia del crecimiento, ofreciendo una representación más fiel de las fluctuaciones climáticas de largo plazo y respaldando su utilidad para futuras reconstrucciones paleoambientales en el hemisferio sur.

Respecto a la señal climática, el crecimiento radial mostro una clara sensibilidad a las condiciones térmicas y a la fase positiva de la Oscilación Antártica. La especie presento correlaciones negativas significativas con las temperaturas de invierno y mediados de primavera, lo que sugiere que el incremento térmico de las últimas décadas ha reducido la disponibilidad hídrica y, con ello, restringiendo el crecimiento de *N.betuloides*. De manera similar, la AAO evidencio una correlación negativa marcada en la mayoría de los meses evaluados, indicando que la predominancia de sus fases positivas también ha limitado el crecimiento radial en periodos recientes. En contraste, la influencia de la precipitación fue menos pronunciada, aunque su rol previo a la temporada de crecimiento continúa siendo relevante para la dinámica hídrica del sitio.

En conjunto, estos resultados refuerzan el potencial de *N. betuloides* como especie indicadora de la variabilidad climática en el sur de Chile y Argentina, y contribuyen a fortalecer la red de estudios dendroclimáticos en ambientes subantárticos. La cronología desarrollada constituye una base sólida para investigaciones futuras orientadas a ampliar la cobertura espacial y temporal de series de anillos en Tierra del Fuego, avanzar en la comprensión de los forzantes climáticos que afectan a los bosques australes y apoyar la evaluación del impacto del cambio climático en los ecosistemas forestales más australes del planeta.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amoroso MM, LD Daniels, R Villalba, P Cherubini. 2015. Does drought incite tree decline and death in *Austrocedrus chilensis* forests? *Journal of Vegetation Science* 26(6):1171–1183.
- 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.
- Aravena JC, BH Luckman. 2009. Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America. *International Journal of Climatology* 29:2106–2120.
- Bigler C, H Bugmann. (2018). Climate-induced shifts in leaf unfolding and frost risk of European trees and shrubs. *Scientific Reports* 8:9865.
- Boisier JP. 2023. CR2MET: Conjunto de datos de precipitación y temperatura de alta resolución para el período 1960–2021 en Chile continental (v2.5) [Set de datos]. Zenodo. Disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>.
- Boninsegna JA, J Keegan, GC Jacoby, R D'Arrigo, RL Holmes. 1989. Dendrochronological studies in Tierra del Fuego, Argentina. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 7:315–326.
- Boninsegna JA, J Argollo, JC Aravena, J Barichivich, D Christie, ME Ferrero, A Lara, C Le Quesne, BH Luckman, M Masiokas, M Morales, JM Oliveira, F Roig, A Srur, R Villalba. 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281:210–228.
- Briffa K, P Jones. 1990. Basic chronology statistics and assessment. En: Cook E, L Kairiukstis eds. *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers. p.137–152.
- Bunn AG. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26:115–124.
- Castellano PL. 2017. Análisis dendrocronológico de los patrones de crecimiento de lenga [*Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) Krasser] y guindo [*N. betuloides* (Mirb.) Oerst.] y sus relaciones con el clima en el Lago del Desierto, Patagonia, Argentina. Tesina de grado, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina. Disponible en: <https://bdigital.uncu.edu.ar/9578>. Consultado 15 sept. 2025.

- Cook ER. 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. PhD Thesis, The University of Arizona.
- Cook ER, RL Holmes. 1999. Program ARSTAN—Chronology development with statistical analysis (User's manual for program ARSTAN). Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.
- Donoso C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Santiago, Chile. 70 p. Disponible en: <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/6178>.
- Fritts HC. 1976. Tree rings and climate. Academic Press.
- Fuentes M, JC Aravena, A Seim, HW Linderholm. 2018. Assessing the dendroclimatic potential of *Nothofagus betuloides* (Magellan's beech) forests in the southernmost Chilean Patagonia. *Trees* 33:557–575.
- Garreaud RD, M Vuille, R Compagnucci, J Marengo. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281(3–4):180–195.
- Garreaud R, P Lopez, M Minvielle, M Rojas. 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate* 26:215–230.
- Grießinger J, L Langhamer, C Schneider, BL Saß, D Steger, P Skvarca, MH Braun, WJH Meier, AM Srur, P Hochreuther. 2018. Imprints of climate signals in a 204-year  $\delta^{18}\text{O}$  tree-ring record of *Nothofagus pumilio* from Perito Moreno Glacier, Southern Patagonia (50°S). *Frontiers in Earth Science* 6.
- Gillett NP, TD Kell, PD Jones. 2006. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters* 33(23).
- Gong D, S Wang. 1999. Definition of Antarctic oscillation index. *Geophysical Research Letters* 26(4):459–462.
- González-Reyes Á, JC Aravena, AA Muñoz, P Soto-Rogel, I Aguilera-Betti, I Toledo-Guerrero. 2017. Variabilidad de la precipitación en la ciudad de Punta Arenas, Chile, desde principios del siglo XX. *Anales del Instituto de la Patagonia* 45:31–44.
- Gouhier T, A Grinsted, V Simko. 2016. Conduct univariate and bivariate wavelet analyses: Package biwavelet. Disponible en: <http://github.com/tgouhier/biwavelet>.
- Gutiérrez E, V Vallejo, J Romaña, J Fons. 1991. The subantarctic *Nothofagus* forests of Tierra del Fuego: Distribution, structure and production. *Homage to Ramon Margalef* 8:351–366.

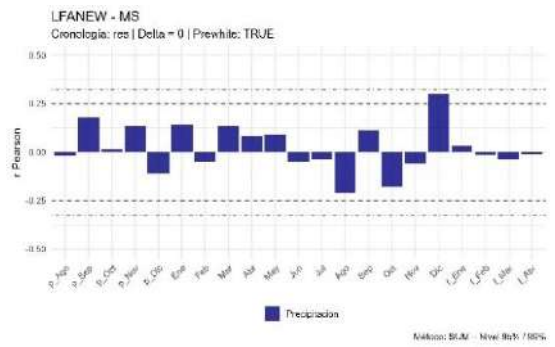
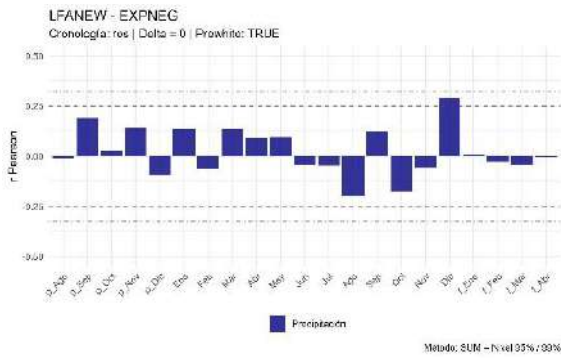
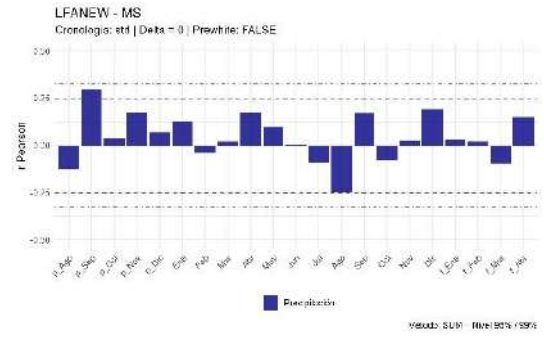
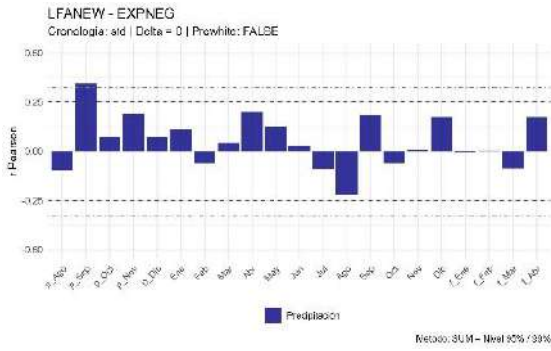
- Hampe A, RJ Petit. 2005. Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters. *Ecology Letters* 8: 461–467.
- Holmes RL. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43:69–78.
- Holmes RL. 1999. Dendrochronology Program Library (DPL): User manual. Laboratory of Tree-Ring Research.
- IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Iturraspe RJ. 2011. Glaciares de Tierra del Fuego. Rodolfo Iturraspe.
- Iverson LR, MW Schartz, AM Prasad. 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, M Kanamitsu, R Kistler, W Collins. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (3): 437-471.
- Köppen W, R Geiger. 1936. Handbuch der Klimatologie: Band 1. Teil C: Klimaklassifikation. Gebrüder Borntraeger.
- Lara A, R Villalba, JC Aravena, A Wolodarsky. 2000. Desarrollo de una red de cronologías de Fitzroya cupressoides (Alerce) para Chile y Argentina. En: Dendrocronología en América Latina. EDIUNC. p.217–244.
- Lara A, JC Aravena, R Villalba, A Wolodarsky-Franke, B Luckman, R Wilson. 2001. Dendroclimatology of high-elevation Nothofagus pumilio forests at their northern distribution limit in the central Andes of Chile. *Canadian Journal of Forest Research* 31(6):925–936.
- Lees M, J Park. 1995. Multiple-taper spectral analysis: A stand-alone C-subroutine. *Science* 21:199–236.
- Llancabure JC. 2011. Relaciones entre el crecimiento de Nothofagus betuloides y el clima local y de gran escala en bosques subantárticos de la Isla Navarino. Tesis de licenciatura, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Luebert F, P Plissock. 2017. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile (Vol. 2). Editorial Universitaria.
- Marshall GJ. 2003. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate* 16:4134–4143.

- Marshall GJ, National Center for Atmospheric Research Staff eds. 2022. The Climate Data Guide: Marshall Southern Annular Mode (SAM) Index (Station-based). Climate Data Guide. Disponible en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/marshall-southern-annular-mode-sam-index-station-based>.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing [Software]. R Foundation for Statistical Computing. Disponible en: <https://www.R-project.org/>.
- Roig FA, R Villalba. 2008. Understanding climate from Patagonian tree rings. En: *Developments in Quaternary Sciences* Vol. 11. p.411–435.
- Sarris D, D Christodoulakis, C Körner. 2011. Impact of recent climatic change on growth of low elevation eastern Mediterranean forest trees. *Climatic Change* 106(2):203–223.
- Schulman E. 1956. Dendroclimatic change in semiarid America. University of Arizona Press.
- Soto-Rogel P, JC Aravena. 2017. Potencial dendroclimático de *Nothofagus betuloides* en la cordillera de Darwin, Tierra del Fuego, Chile. *Bosque* 38(1):155–168.
- Soto-Rogel P, JC Aravena, WJH Meier, P Gross, C Pérez, Á González-Reyes, J Griebinger. 2020. Impact of extreme weather events on aboveground net primary productivity and sheep production in the Magellan Region, southernmost Chilean Patagonia. *Geosciences* 10:318.
- Soto-Rogel P, JC Aravena, R Villalba, C Bringas, WJH Meier, A González-Reyes, J Griebinger. 2022. Two *Nothofagus* species in southernmost South America are recording divergent climate signals. *Forests* 13:794.
- Stokes MA, TL Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Arizona Press.
- Villalba R, A Lara, JA Boninsegna, M Masiokas, S Delgado, JC Aravena, FA Roig, A Schmelter, A Wolodarsky, A Ripalta. 2003. Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years. En: *Climate variability and change in high elevation regions: Past, present & future*. Springer. p.177–232.
- Villalba R, M Grosjean, T Kiefer. 2009. Long-term multi-proxy climate reconstructions and dynamics in South America (LOTRED-SA): State of the art and perspectives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281:175–179.
- Villalba R, A Lara, M Masiokas, R Urrutia, BH Luckman, GJ Marshall, IA Mundo, DA Christie, ER Cook, R Neukom, et al. 2012. Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nature Geoscience* 5:793–798.

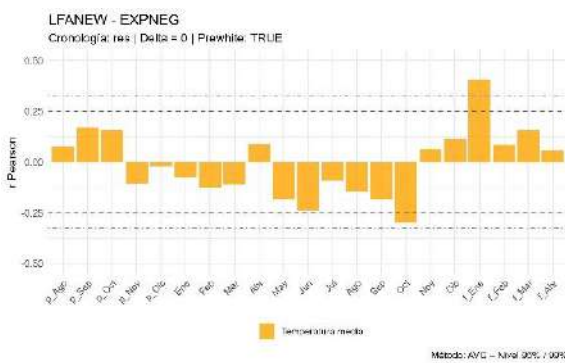
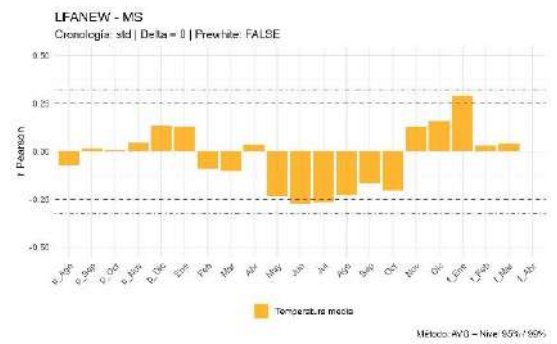
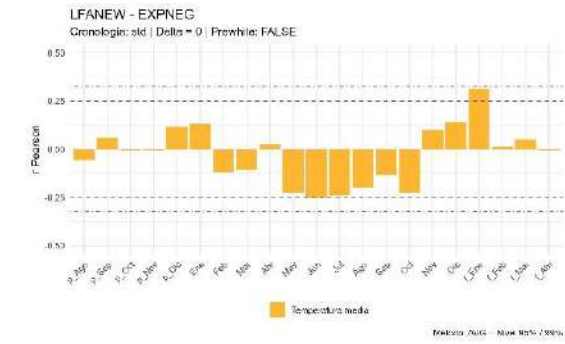
Wigley TML, KR Briffa, PD Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23(2):201–213.

# ANEXOS

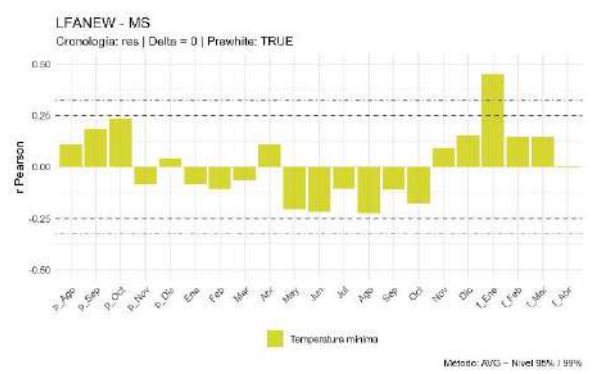
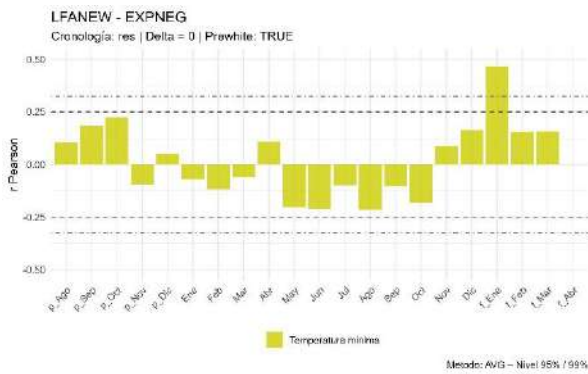
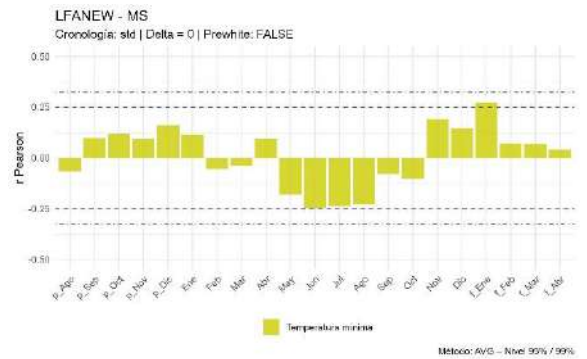
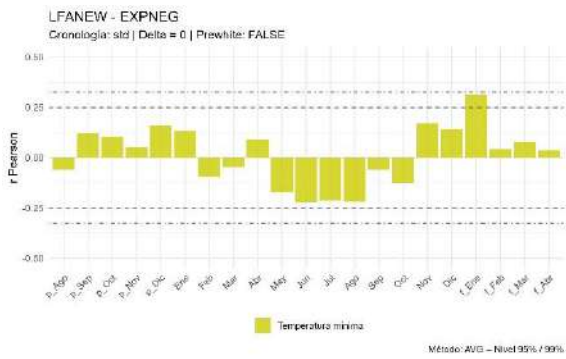
## Anexo 1. Coeficientes de correlación de Pearson entre las cronologías de *Nothofagus betuloides* (RWI) y la precipitación



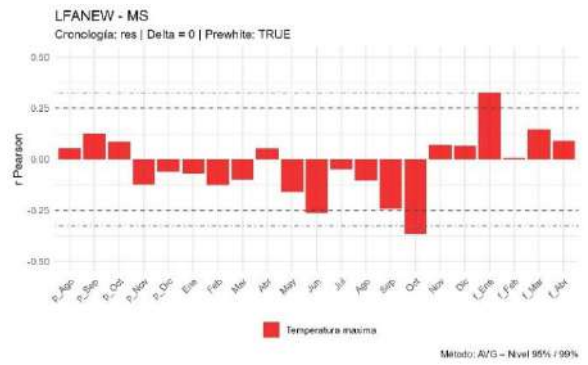
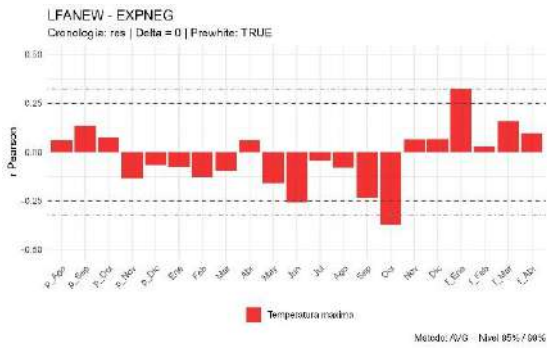
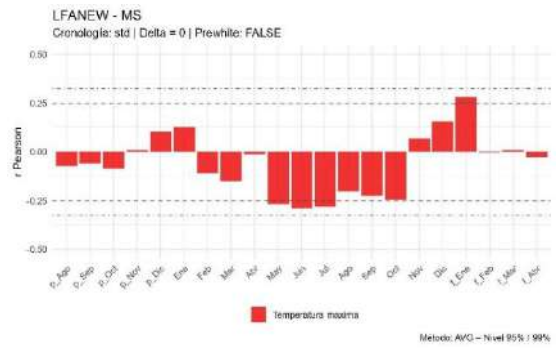
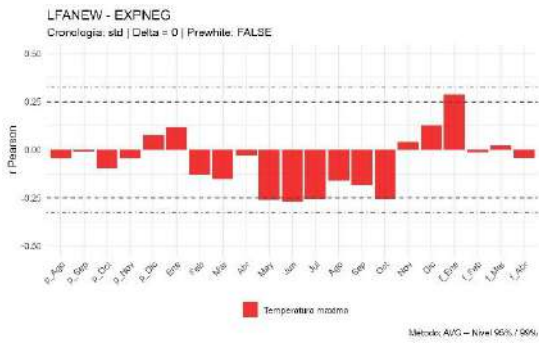
**Anexo 2.** Coeficientes de correlación de Pearson entre las cronologías de *Nothofagus betuloides* (RWI) y la temperatura media



**Anexo 3.** Coeficientes de correlación de Pearson entre las cronologías de *Nothofagus betuloides* (RWI) y la temperatura mínima



**Anexo 4.** Coeficientes de correlación de Pearson entre las cronologías de *Nothofagus betuloides* (RWI) y la temperatura máxima



**Anexo 5.** Coeficientes de correlación de Pearson entre las cronologías de *Nothofagus betuloides* (RWI) y la Oscilación Antártica (AAO)

