



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de Pregrado

Carrera de Geografía

CAMBIOS DEL ÁREA DEL GLACIAR GREY, PARQUE NACIONAL TORRES DEL  
PAINE, Y SU ESTUDIO A TRAVÉS DE LA CLIMATOLOGÍA Y LA  
DENDROCROLOGÍA.

Memoria para optar al título de Geógrafa  
CATALINA MURIETTE FERNÁNDEZ GARCÍA

Profesor Guía: Pablo Andrés Sarricolea Espinoza

Profesor Co-Guía: Juan Carlos Aravena Donaire

SANTIAGO – CHILE

2021

*A la memoria de Germán García y Marta Fuentes,*

*Por ser los mejores abuelos del mundo,*

*Por su inmenso amor y compañía,*

*Por darme los mejores recuerdos de mi niñez.*

*Los amo por siempre.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer infinitamente al profesor Juan Carlos Aravena, por confiar en mí y considerarme como una más del equipo, por su gran disposición a enseñar, y por darme la oportunidad de profundizar en el maravilloso mundo de la dendrocronología.

A Christian Bringas, por tu amistad, dedicación, paciencia y constante apoyo en el desarrollo de este escrito.

Al equipo DendroLab - UMAG en general, fue un placer poder estar rodeada de personas como ustedes, gracias por la buena onda y la disposición de todes a ayudarme ante cualquier duda.

Quiero agradecer también a mi profesor guía Pablo Sarricolea, quien desde un principio estuvo dispuesto a acompañarme en la realización de mi memoria, gracias por su compromiso y motivación en el desarrollo de un estudio como este, gracias por disfrutarlo tanto como yo.

También agradezco al equipo de Movilidad Estudiantil de la Universidad de Chile, en especial a Elizabeth y William, sin ustedes no habría podido realizar mi práctica profesional en Punta Arenas, y nada de esto habría pasado.

Quiero agradecer a Jacqueline Álvarez por darme la libertad de instalar el laboratorio en casa, por las largas conversaciones y por los cafecitos. A Héctor Belizar, por tu leal amistad, por tu preocupación, por las risas, los cantos y las aventuras improvisadas. Ustedes hicieron que mi estadía en Punta Arenas en tiempos de pandemia fuera mucho más amena.

Agradezco a todes los que fueron parte de mi proceso universitario en FAU, en especial a mis mejores amigos, Héctor, Paula, Karen, Grace, Elías y Matías, gracias por las conversaciones de mil horas, las risas, el apoyo y los consejos.

A mis amigas Paulina y Camila, gracias por estar presentes hasta el día de hoy. A Valery por su apoyo incondicional en casi diez años de amistad, a Giovanna y David, por considerarme como una más de la familia.

A Marco y Zuny, gracias tíos por siempre estar presentes en mi vida.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia, a mi hermano mayor Roberto y a mis padres, Patricia y Edgar, gracias por tanto amor, comprensión, preocupación y apoyo, gracias por aguantar mis locuras, los amo con todo mí ser.

## RESUMEN

En el actual escenario de cambio climático, uno de los impactos visibles y más importantes en el mundo es la pérdida y reducción de los glaciares. En Chile, una de las áreas más afectadas corresponde a la zona Austral de la Patagonia, en donde se encuentran los Campos de Hielo Norte (CHN) y Sur (CHS).

La presente investigación consistió en profundizar el conocimiento sobre los cambios del área del glaciar Grey, ubicado en el Parque Nacional Torres del Paine, Región de Magallanes, a través de la climatología y la dendrocronología.

A partir de muestras de *Nothofagus pumilio* se crearon dos cronologías de ancho de anillos para los sitios de muestreos correspondientes a la morrena lateral (50°57'26"S - 73°11'44"O) y Nunatak del glaciar Grey (50°59'32"S - 73°12'40"O); las cuales, posteriormente, fueron correlacionadas con variables climáticas (temperatura y precipitación media) obtenidas desde datos grillados correspondientes al glaciar Grey, y de las estaciones meteorológicas de Torres del Paine, Puerto Natales y Punta Arenas, con el objetivo de identificar el comportamiento o la respuesta del crecimiento radial de *Nothofagus pumilio* en áreas cercanas al glaciar.

Los resultados obtenidos indicaron que ambos sitios de muestreo, tienen una tendencia a la disminución del crecimiento radial de *Nothofagus pumilio* relacionándose directamente con el efecto que ejercen las temperaturas de verano e invierno previas al periodo de crecimiento y al efecto de las precipitaciones de invierno de dos años previos al periodo de crecimiento y de otoño previo al periodo de crecimiento; Por ende, los resultados demostraron una respuesta al clima fuertemente influenciada por los factores locales de los sitios.

Finalmente, a partir de imágenes satelitales se calculó el área de cobertura del glaciar Grey entre los años 1979 y 2020, lo que dejó en evidencia el claro retroceso que ha tenido este glaciar durante las últimas décadas; de esta manera, al relacionar las variables climáticas del producto grillado TerraClimate (precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas) con las áreas calculadas, de acuerdo a la correlación de Pearson, se obtuvo que el aumento de las temperaturas máximas influye directamente en la disminución de la cobertura del glaciar (área). Mientras, que por otro lado, respecto a las tasas de retroceso, no se logró identificar una relación significativa entre estas y las variables climáticas.

**Palabras claves:** Dendrocronología – Dendroclimatología –

*Nothofagus pumilio* – Glaciar Grey

## ABSTRACT

In the current climate change scenario, one of the most visible and important impacts worldwide is the loss and reduction of glaciers. In Chile, one of the most affected areas corresponds to the southern zone of Patagonia, where the Northern (CHN) and Southern (CHS) Ice Fields are located.

The present research consisted of deepening the knowledge about the changes in the area of the Grey glacier, located in the Torres del Paine National Park, Magallanes Region, through climatology and dendrochronology.

From *Nothofagus pumilio* samples, two ring-width chronologies were created for the sampling sites corresponding to the lateral moraine (50°57'26 "S - 73°11'44 "W) and Nunatak of Grey glacier (50°59'32 "S - 73°12'40 "W); These were subsequently correlated with climatic variables (temperature and mean precipitation) obtained from gridded data corresponding to the Grey glacier, and from the meteorological stations of Torres del Paine, Puerto Natales and Punta Arenas, with the aim of identifying the behaviour or response of *Nothofagus pumilio* forests located in areas close to the glacier.

The results obtained indicated that both sampling sites have a tendency to decrease the radial growth of *Nothofagus pumilio* directly related to the effect of summer and winter temperatures prior to the growth period and to the effect of winter precipitation two years prior to the growth period and autumn precipitation prior to the growth period; Thus, the results showed a response to climate strongly influenced by local factors of the sites.

Finally, satellite images were used to calculate the area of coverage of the Grey glacier between 1979 and 2020, which showed the clear retreat of this glacier over the last decades; thus, by relating the climatic variables of the TerraClimate gridded product (precipitation and average, maximum and minimum temperatures) with the calculated areas, according to Pearson's correlation, it was obtained that the increase in maximum temperatures directly influences the decrease in glacier coverage (area). On the other hand, with respect to retreat rates, it was not possible to identify a significant relationship between these and the climatic variables.

**Keywords:** Dendrochronology – Dendroclimatology – *Nothofagus pumilio* – Grey glacier

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN .....	11
1.1 Introducción .....	11
1.2 Planteamiento del problema y estado del asunto .....	12
1.3 Área de estudio .....	17
1.4 Objetivos .....	20
1.4.1 Objetivo General .....	20
1.4.2 Objetivos Específicos.....	20
1.5 Hipótesis .....	20
CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....	21
2.1 Dendrocronología .....	21
2.1.1 Colecta de muestras en terreno.....	21
2.1.2 Preparación de las muestras .....	22
2.1.3 Conteo de anillos y cofechado visual.....	22
2.1.4 Construcción de las cronologías de <i>Nothofagus pumilio</i> .....	23
2.1.4.1 Medición de anillos .....	23
2.1.4.2 Programa COFECHA (Holmes, 1983).....	23
2.1.4.3 Estandarización.....	24
2.1.4.4 Señal expresada de la población (EPS) .....	25
2.1.4.5 Análisis espectral.....	25
2.2 Variables climáticas y estaciones meteorológicas para analisis dendroclimático .....	26
2.3 Dendroclimatología .....	27
2.3.1 Relación con la temperatura.....	27
2.3.2 Relación con la precipitación .....	28
2.4 Cambios en el área del glaciar Grey .....	28
2.4.1 Relación de variables climáticas con las áreas y tasas de retroceso del glaciar Grey 30	
CAPÍTULO 3: RESULTADOS .....	31
3.1 Crecimiento de <i>Nothofagus pumilio</i> en las inmediaciones del glaciar Grey a través de cronologías de ancho de anillos.....	31
3.1.1 Muestras CPG .....	31

3.1.2 Muestras NP.....	36
.....	39
3.2 Comparación de las variables climáticas como temperatura y precipitación con la cronología de ancho de anillos de <i>Nothofagus pumilio</i> .....	40
3.2.1 Clima de Torres del Paine .....	40
3.2.1.1 CPG .....	40
3.2.1.2 NP.....	41
3.2.2 Clima de Puerto Natales.....	43
3.2.2.1 CPG .....	43
3.2.2.2 NP .....	44
3.2.3 Clima de Punta Arenas.....	45
3.2.3.1 CPG .....	45
3.2.3.2 NP.....	46
3.2.4 Clima de glaciar Grey.....	48
3.2.4.1 CPG .....	48
3.2.4.2 NP .....	49
3.3 Variaciones del glaciar Grey y su relación con variables climáticas.....	51
3.3.1 Digitalización y cálculo de áreas.....	51
3.3.2 Tasas de retroceso glaciar Grey.....	53
3.3.3 Relación entre áreas del glaciar, tasas de retroceso y variables climáticas .....	54
3.3.3.1 Variables climáticas y cambios de área del glaciar Grey .....	54
3.3.3.2 Variables climáticas y tasas de retroceso .....	55
CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN .....	57
4.1 Discusión .....	57
4.1.1 Tendencias de crecimiento de las cronologías de <i>Nothofagus pumilio</i> en glaciar Grey	57
4.1.2 Respuesta de anillos de crecimiento ante variables climáticas. ....	61
4.1.2.1 CPG .....	61
4.1.2.2 NP.....	62
4.1.3 Retroceso glaciar Grey en relación al clima.....	64
4.2 Conclusiones.....	66

BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Glaciar Grey.....	17
Figura 2: Retroceso glaciar Grey (1945 a 2017). Fuente: Laboratorio de Glaciología, 2020. .....	18
Figura 3: Sitios de muestreo. El área de muestreo de la morrena lateral (50°57'26"S - 73°11'44"O) se encuentra en el marcador verde (CPG), mientras que el Nunatak (50°59'32"S - 73°12'40"O) en el marcador celeste (NP). Fuente: Elaboración propia a partir de datos disponibles en Google Earth Pro, 2021.....	21
Figura 4: Lupa binocular Nikon SMZ800 y dendrómetro VELMEX Inc. Fuente: Captura propia, 2020.....	23
Figura 5: Combinación de bandas para imagen satelital Landsat 8 glaciar Grey año 2020. (a)754 (b)742 (c)562 (d)543. Para ver la aplicación o descripción de estas combinaciones ver anexo 3. ....	29
Figura 6: Cronología estándar de la morrena lateral del glaciar Grey. En el eje Y izquierdo: índice de ancho de anillos, eje Y derecho: número total de muestras.....	32
Figura 7: Cronología truncada para muestras CPG. En el eje Y izquierdo el índice de ancho de anillos, en el eje Y derecho, la señal expresada por la población (EPS). ....	33
Figura 8: Espectro de frecuencia dominante de la cronología desde el año 1709 al 2014. En verde cronología muestras CPG, límite de confianza (LC) naranja 99%, morado 95% y fucsia 90% .....	34
Figura 9: Espectro de frecuencia dominante de la cronología desde el año 1870 al 2014. En verde cronología muestras CPG, límite de confianza (LC) naranja 99%, morado 95% y fucsia 90% .....	34
Figura 10: Análisis Wavelet de la cronología de la morrena lateral (1870 a 2014).....	35
Figura 11: Cronología estándar del Nunatak del glaciar Grey. En el eje Y izquierdo: índice de ancho de anillos, eje Y derecho: número total de muestras.....	36
Figura 12: Cronología truncada para muestras NP. En el eje Y izquierdo: el índice de ancho de anillos, en el eje Y derecho: la señal expresada por la población (EPS). ....	37
Figura 13: Espectro de frecuencia dominante de la cronología desde el año 1854 al 2014. En verde cronología muestras NP, límite de confianza (LC) naranja 99%, morado 95% y fucsia 90% .....	38
Figura 14: Espectro de frecuencia dominante de la cronología desde el año 1890 al 2014. En verde cronología muestras NP, límite de confianza (LC) naranja 99%, morado 95% y fucsia 90% .....	39
Figura 15: Análisis Wavelet de la cronología del Nunatak (1890 a 2014).....	39

Figura 16: Relación entre anomalías de temperatura (TDP) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.....	41
Figura 17: Relación entre anomalías de precipitación (TDP) y ancho de anillos cronología estándar CPG.....	41
Figura 18: Relación entre anomalías de temperatura (TDP) y ancho de anillos de cronología estándar NP.....	42
Figura 19: Relación entre anomalías de precipitación (TDP) y ancho de anillos de cronología estándar NP.....	42
Figura 20: Relación entre anomalías de temperatura (PN) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.....	43
Figura 21: Relación entre anomalías de precipitación (PN) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.....	44
Figura 22: Relación entre anomalías de temperatura (PN) y ancho de anillos de cronología estándar NP.....	44
Figura 23: Relación entre anomalías de precipitación (PN) y ancho de anillos de cronología estándar NP.....	45
Figura 24: Relación entre anomalías de temperatura (PUQ) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.....	46
Figura 25: Relación entre anomalías de precipitación (PUQ) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.....	46
Figura 26: Relación entre anomalías de temperatura (PUQ) y ancho de anillos de cronología estándar NP.....	47
Figura 27: Relación entre anomalías de precipitación (PUQ) y ancho de anillos de cronología estándar NP.....	47
Figura 28: Relación entre anomalías de temperatura (GG) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.....	48
Figura 29: Relación entre anomalías de precipitación (GG) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.....	48
Figura 30: Relación entre anomalías de temperatura (GG) y ancho de anillos de cronología estándar NP.....	49
Figura 31: Relación entre anomalías de precipitación (GG) y ancho de anillos de cronología estándar NP.....	50
Figura 32: Cambios de área en km <sup>2</sup> del glaciar Grey entre los años 1979 y 2020 .....	51
Figura 33: Variación área glaciar Grey desde 1979 (en rojo) al 2020 (azul). .....	52
Figura 34: Variaciones frontales glaciar Grey entre 1979 al 2020.....	53
Figura 35: Tasas de retroceso glaciar Grey .....	53
Figura 36: Relación entre temperaturas máximas (promedio por periodo) y áreas del glaciar Grey .....	54
Figura 37: Relación entre precipitaciones (promedio por periodo) y áreas del glaciar Grey. ....	55

Figura 38: Relación entre temperaturas máximas (promedio por periodo) y tasas de retroceso del glaciar Grey.....	55
Figura 39: Relación entre precipitaciones (promedio por periodo) y tasas de retroceso del glaciar Grey .....	56
Figura 40: Cronología estándar CPG filtrada. EPS > 0,85 para el periodo temporal desde 1870 al 2014. ....	58
Figura 41: Cronología estándar NP filtrada. EPS > 0,85 para el periodo temporal desde 1890 al 2014. ....	58

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción de estaciones climáticas usadas en el análisis dendroclimático. ....	26
Tabla 2: Descripción datos grillados utilizados en este estudio. ....	27
Tabla 3: Imágenes satelitales glaciar Grey .....	28
Tabla 4: Resultados muestras CPG en COFECHA .....	31
Tabla 5: Resultados muestras NP en COFECHA.....	36
Tabla 6: Resumen resultados de correlación entre anomalías de las cronologías (CPG y NP) y las variables climáticas de precipitación y temperatura .....	50
Tabla 7: Áreas en km <sup>2</sup> por año del glaciar Grey .....	51

## CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La presente memoria se inserta en el proyecto FONDECYT N° 1180717 titulado “*High-resolution Holocene glacial chronologies across Patagonia (47°-51°S): testing mechanisms of initiation and modulation of glacial events in the southern Andes*”, el cual, a través de la combinación de metodologías como la geomorfología, estratigrafía y dendrocronología, busca reconstruir la historia de las fluctuaciones glaciares a través del análisis de glaciares de montaña, puesto que estos son más sensibles al clima, para desarrollar una cronología glacial de alta resolución del Holoceno para los Andes australes desde los 47° a los 51° S.

En la actualidad, es posible ver como la aceleración del cambio climático ha generado una serie de impactos a nivel mundial, vinculados principalmente al aumento de temperaturas, variación en las precipitaciones, elevación del nivel del mar producto del derretimiento de hielos y la existencia de fenómenos meteorológicos extremos (Useros, 2013). Y si bien, esta variabilidad climática afecta en distintos aspectos, uno de los impactos visibles más importantes en el mundo, es la pérdida y reducción de los glaciares (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2014).

A nivel nacional una de las áreas más afectadas corresponde a la Patagonia, puesto que los Campos de Hielo Norte (CHN) y Sur (CHS) en las últimas décadas han presentado una dramática pérdida en la superficie de sus glaciares (Foresta et al., 2018; López et al., 2010; Masiokas et al., 2020; Rivera et al., 2011).

En base a lo anterior, el objetivo principal de esta memoria consistió en analizar los cambios en el área del glaciar Grey, ubicado en el Parque Nacional Torres del Paine, Región de Magallanes, a través de la climatología y dendrocronología.

Para llevar a cabo el propósito de esta investigación, como primer paso se determinó el crecimiento de *Nothofagus pumilio* en las inmediaciones del glaciar Grey a través de la elaboración de cronologías de ancho de anillos para dos sitios de muestreo. Luego se correlacionaron las variables climáticas (precipitación y temperatura) con las cronologías de ancho de anillos del glaciar Grey obtenidas y posteriormente con las fluctuaciones del glaciar Grey, con el fin de identificar si dichas variables climáticas son significativas o determinantes en el comportamiento del glaciar.

Los resultados obtenidos en esta investigación, se presentan conforme al orden de los objetivos específicos, por lo tanto, primero se exponen las cronologías de ancho de anillos

obtenidas a partir de las muestras de *Nothofagus pumilio* pertenecientes a los sitios de muestreo cercanos al glaciar Grey, y luego, se presentan los resultados de la correlación entre las variables climáticas con las cronologías de crecimiento arbóreo.

Posterior a esto, se exhiben los cambios de área y las tasas de retroceso del glaciar obtenidas, para finalmente, mostrar también los resultados de la correlación entre esta información y las variables climáticas.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTADO DEL ASUNTO

A lo largo de la porción occidental de América del Sur, se extiende la Cordillera de los Andes, la cual, posee una extensión de 8.000 km aproximadamente desde los 11°N en el norte de Colombia y Venezuela hasta los 55°S en el sur de Chile y Argentina (Masiokas et al., 2020). La Cordillera de los Andes, al poseer un gran rango latitudinal, contiene una increíble variedad de condiciones topográficas y climáticas que dan como resultado una región montañosa única en la tierra con una criósfera muy diversa, que incluye “extensas áreas cubiertas de nieve estacional, numerosos glaciares tropicales y extra tropicales, y muchas formaciones montañosas de permafrost” (Masiokas et al., 2020, p.1).

Según González et al. (2019), sin considerar la Antártica, la mayor parte de la criósfera que se encuentra en el hemisferio sur está en los Andes y si bien, como se mencionó anteriormente esta se extiende a lo largo de Sudamérica, la mayoría de la criósfera andina se encuentra en territorio chileno.

Chile continental, debido a sus características geográficas y su extensa cobertura latitudinal, posee el 80 % de la superficie total de los glaciares de Sudamérica y también contiene la tercera reserva de agua más grande del planeta (González et al., 2019). Esta condición, se debe principalmente a que la criósfera andina mediterránea y la extensa criósfera patagónica se ubican en territorio nacional.

El área de glaciares en el país es cercana a 23.000 km<sup>2</sup>, y si bien, existen todo tipo de glaciares y coberturas nivales a lo largo de la Cordillera de los Andes, la concentración de esta superficie se encuentra en la zona sur, específicamente, en la Patagonia y Tierra del Fuego con un 89,4%, mientras que en la zona Norte y Centro-Sur, la cobertura glaciar corresponde a 0,8% y 9,8% respectivamente (Barcaza et al., 2017).

La mayor superficie de glaciares se encuentra en la zona sur-austral de la Patagonia, debido a que en esta área encontramos los sistemas de Campos de Hielo Norte (CHN) y Sur (CHS), estas reservas se encuentran fuertemente amenazadas por el calentamiento global, por lo que, en los últimos años la mayoría de los glaciares han presentado retrocesos y pérdidas de masa de manera considerable (González et al., 2019).

En Patagonia, los CHN y CHS han sido foco de extensas investigaciones por numerosos autores, puesto que en las últimas décadas se ha detectado una dramática reducción en la superficie de estos, acompañada de retrocesos frontales generalizados (Rivera et al., 2011). Además, existe una característica común en gran parte de los glaciares de los Campos de Hielo, vinculada al término de sus frentes en agua, ya sea en lagunas o fiordos sometidos a mareas (Abdel-Jaber et al., 2019), condición que hace que estos sean considerados muy vulnerables.

Al interior de los CHS, en el Parque Nacional Torres del Paine, se encuentra el glaciar Grey, el cual, al igual que otros glaciares ha presentado una considerable pérdida de masa debido al desprendimiento de grandes porciones de hielo, llegando incluso a un evento de calving de una pérdida de casi  $1\text{km}^2$ , que terminó bloqueando totalmente el lago Grey. Y si bien, estos fenómenos son repentinos “es muy probable que responda al calentamiento atmosférico de las últimas décadas” (Rivera et al., 2011).

De acuerdo a Villalba (2019) en este contexto de cambio climático, las respuestas de los cuerpos de hielo involucran una compleja interacción entre cambios de temperatura, radiación solar, precipitación, entre otras, que influyen en el balance de masa y energía de los glaciares, llevando consigo el retroceso de los frentes de hielo.

Históricamente, debido a la compleja interacción entre factores endógenos, exógenos y astronómicos, nuestro planeta ha estado expuesto a una serie repetitiva de períodos glaciales e interglaciares, los cuales, a través de la dinámica de épocas más frías o cálidas generaron transformaciones en el tiempo, vinculadas a variaciones en clima, aumento o disminución del nivel del mar, desplazamientos en las placas tectónicas, como también respecto a la distribución o extinción de especies (Maidana, 2014).

Como consecuencia de los cambios mencionados anteriormente, la superficie terrestre fue modificándose hasta llegar a lo que conocemos actualmente. Sin embargo, todas estas variaciones en el tiempo fueron dejando rastros y evidencias en la Tierra (Maidana, 2014), las cuales, han sido fundamentales para la realización de estudios o investigaciones sobre la historia geológica y sobre la evolución del clima o la vida en el planeta (Viñas, 2012).

En este contexto, el avance o retroceso de los hielos y el registro de estas fluctuaciones glaciares, han sido de gran utilidad para la reconstrucción de información sobre la variabilidad climática pasada en la mayoría de las regiones montañosas del mundo. De esta manera, de acuerdo a Solomina et al. (2016), los glaciares son *proxies* climáticos sensibles y la variación en su longitud, área y volumen, proporcionan información clave para comparar secuencias de eventos glaciales entre distintas zonas o regiones, como también para descifrar en diferentes escalas espaciales o temporales los cambios climáticos pasados.

Existen una serie de estudios que buscan obtener información sobre esta variabilidad climática y debido a la escasez de los registros instrumentales para saber el comportamiento

del clima pasado (Soto-Rogel y Aravena., 2017; White & Copland, 2015), se utilizan *proxies* climáticos independientes como los glaciares o los anillos de árboles.

En el hemisferio sur, tanto el último máximo glacial (~34 to ~18 ka) como la última terminación glacial (~18 to 11.5 ka), dejaron evidencias que proporcionaron información clave para comprender y realizar cronologías sobre las secuencias de eventos climáticos en el pasado (Clapperton, 2000; Kaplan, Moreno y Rojas, 2008). Sin embargo, para la zona sur de los Andes, pese a los esfuerzos científicos para comprender la historia y evolución climática del Holoceno, esta información continúa siendo relativamente poco conocida, debido a que las causas, los patrones y la evidencia de estas fluctuaciones glaciales durante este periodo aún son difíciles de descifrar (Masiokas et al., 2009).

Por lo tanto, ante este contexto de poca claridad y falta de registros geológicos completos respecto a los eventos glaciares que tuvieron lugar durante el Holoceno tardío, se encuentran varias investigaciones llevadas a cabo por diferentes grupos de investigación, nacionales y extranjeros (Masiokas et al., 2009; Rivera et al., 2012; Ruiz, 2020; Sáez, 2018; Sugiyama, Minowa y Schaefer, 2019). En este punto, la criósfera de Chile funciona como un laboratorio natural en donde se busca obtener información sobre evolución glaciaria y cambio climático.

Una técnica de gran utilidad para enfrentar ciertos vacíos o ausencia de información paleoambiental, es la dendrocronología, disciplina científica que estudia la relación entre los árboles y el tiempo, que se encuentra “dotada de un conjunto de principios, técnicas y métodos que permiten datar los anillos de crecimiento anuales, extraer, separar e interpretar la información que contienen de los diferentes factores que han influido en su crecimiento” (Gutiérrez, 2009, p.2).

De acuerdo a Bringas (2019), “el primer principio de todos los estudios dendrocronológicos es que casi todas las especies de árboles en bosques templados producen una sola capa de madera cada año denominado anillo de crecimiento” (p.19). Bajo esa línea, cabe mencionar que en los árboles, la formación de anillos es muy sensible a las condiciones ambientales, por lo que, es posible identificar la variabilidad climática y la composición de la atmósfera de periodos pasados a través del registro de estas condiciones en los anillos ya formados (Castellano, 2017). Esta condición permite que la dendrocronología sea un área con gran transversalidad, con subdisciplinas tales como la dendroecología, dendrogeomorfología, dendroclimatología, entre otras (Castellano, 2017; Fritts, 1976).

De acuerdo a Llorente (2012), los árboles funcionan como grandes archivos de información climática y ambiental, por lo tanto, al considerar que existe una alta variedad de especies arbóreas que pueden alcanzar una edad muy avanzada, el uso de técnicas como la dendrocronología, permite que sea posible obtener información de períodos mucho más extensos.

La dendroclimatología ha sido clave para documentar los cambios climáticos que tuvieron lugar en Patagonia durante el siglo XX, puesto que esta subdisciplina al estudiar las fluctuaciones climáticas en periodos de tiempo cubiertos por las series de crecimiento arbóreo ha permitido avanzar en la obtención de datos climáticos, los cuales, debido a la escasez de estaciones meteorológicas existentes en Patagonia, no poseen registros longevos ni completos (Castellano, 2017; Ruiz, 2020)

En la búsqueda por comprender la variabilidad climática a través de la dendroclimatología, destaca la especie *Nothofagus pumilio*, que de acuerdo a Donoso (2006) es una de las seis especies de *Nothofagus caducifolias* que se encuentran en Chile, endémica de los bosques templados de Sudamérica.

La distribución geográfica de esta especie en Chile (ver anexos 1 y 2), es la más extensa entre los *Nothofagus* sudamericanos, puesto que abarca más de 18 grados de latitud a lo largo de la Cordillera de los Andes, es decir, 2.200 km, que se extienden desde la cordillera de Talca (35°35' S) hasta el sur del Canal Beagle (55°31' S) (Duarte, 2014).

Esta gran amplitud ecológica que posee la especie *Nothofagus pumilio* (lenga) y su dominio en los ecosistemas boscosos en la región de los Andes australes, posiciona a esta especie como una de las más utilizadas en estudios dendrocronológicos (Duarte, 2014). Es así como, utilizando esta única especie, se pueden generar reconstrucciones climáticas para una larga transecta de 2.200 km aproximadamente (Lara et al. 2001).

De acuerdo a un estudio latitudinal de crecimiento arbóreo de *N.pumilio* entre los 35° y los 55°S, Lara et al. (2005), encontraron una correlación positiva con la precipitación anual y negativa con la temperatura media anual en el extremo norte de la distribución de esta especie (35°S); sin embargo, esta investigación plantea que al aumentar la latitud la correlación se transforma en positiva con la temperatura media anual.

Masiokas y Villalba (2004) evaluó la relación entre el crecimiento de lengas y las variables climáticas regionales para la zona sur de los Andes patagónicos, específicamente en el valle de Ameghino (50°25'S - 72°10'O). Dicha investigación se llevó a cabo comparando la precipitación y temperatura con el crecimiento radial arbóreo, arrojando como resultado una correlación negativa con las temperaturas de primavera verano (noviembre a marzo) y positiva con las precipitaciones de primavera (octubre a diciembre).

Aravena et al (2002), por otro lado, identificaron el comportamiento de *Nothofagus pumilio* en la parte superior del límite arbóreo en el sur de la Patagonia, realizando un estudio en donde se consideraron varias cronologías de la misma especie en cuestión entre latitudes 51°- 55°S, mostrando una correlación positiva con la temperatura y negativa con la precipitación. Resultados similares obtuvo Álvarez et al. (2015), puesto que dicha investigación reveló que el crecimiento radial de lenga en el límite arbóreo del volcán Choshuenco (39°53'S y 72°03'O), está correlacionado negativamente con las

precipitaciones de primavera (noviembre y diciembre) mientras que positiva con la temperatura durante el inicio del verano (noviembre a enero).

Autores como Watson y Luckman (2004), a partir de la identificación de los patrones de crecimiento arbóreo y la respuesta de estos ante las variaciones climáticas, reconstruyeron el comportamiento del glaciar Peyto en Canadá, obteniendo una fuerte correlación entre el balance de masa con las temperaturas de veranos más cálidos asociados a un balance de masa negativo (mayor ablación).

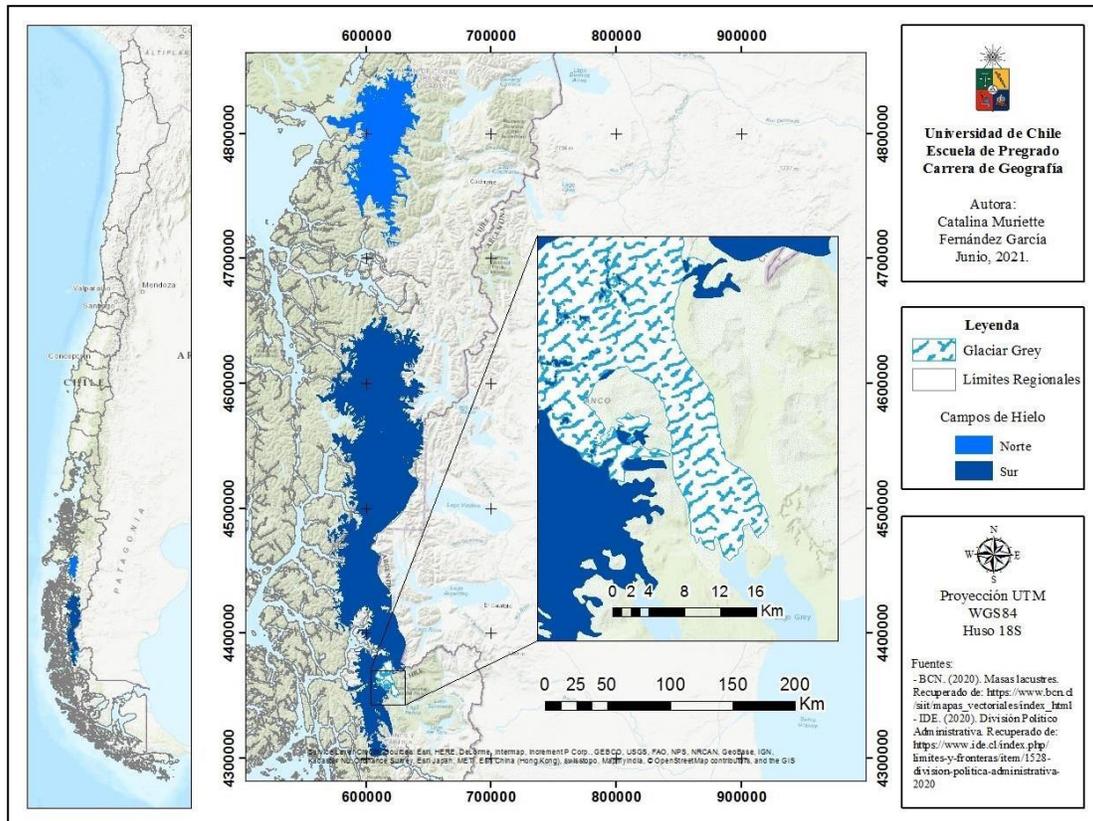
Ruiz (2020), realizó un estudio que consistió en relacionar parámetros climáticos, tales como la temperatura y precipitación con las variaciones en el crecimiento arbóreo de *Nothofagus pumilio* ubicados en el límite arbóreo y el comportamiento de los glaciares localizados en el Monte Tenerife, Provincia de Última Esperanza. Dicha investigación, obtuvo como resultados que las precipitaciones de primavera y principios de verano de dos años previos se correlacionaban negativamente con el crecimiento de lengas, mientras que la disminución de la precipitación se correlaciona positivamente con el glaciar, de manera que si las precipitaciones disminuyen esto contribuye al retroceso del mismo. En cuanto a la variable de temperatura, debido al aumento de temperaturas registrados en el último tiempo, también se evidenció una disminución del ancho de anillos de *Nothofagus pumilio* en las últimas décadas, por lo tanto, se confirma que el aumento de temperaturas y disminución de las precipitaciones en el área de estudio afecta directamente en la contracción del glaciar Tenerife.

Estudios como los mencionados anteriormente, dejan en evidencia que el crecimiento radial de *Nothofagus pumilio*, se ve directamente influenciado por las variables de temperatura o precipitación, o bien la combinación de ambas (Masiokas y Villalba, 2004). Y de la misma forma, vincular los componentes tales como crecimiento arbóreo, clima y glaciares, resulta de gran utilidad para evaluar las consecuencias del actual escenario de cambio climático (Sáez, 2018).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la presente memoria, busca proporcionar nueva información sobre los cambios en el área de cobertura del glaciar Grey, a través del análisis de la relación entre las cronologías de ancho de anillos, variables climáticas (precipitación y temperatura) y el comportamiento del glaciar.

### 1.3 ÁREA DE ESTUDIO

Formando parte de los Campos de Hielo Sur, en el Parque Nacional Torres del Paine, en los  $51^{\circ}01'00''\text{S}$  y  $73^{\circ}16'00''\text{O}$  (ver figura 1), se encuentra ubicado el glaciar Grey (Rivera y Casassa, 2004), el cual, corresponde a “una lengua sureste de los CHS, que desemboca a través de 3 lóbulos distintos en el lago del mismo nombre” (Sáez, 2018, p.34).

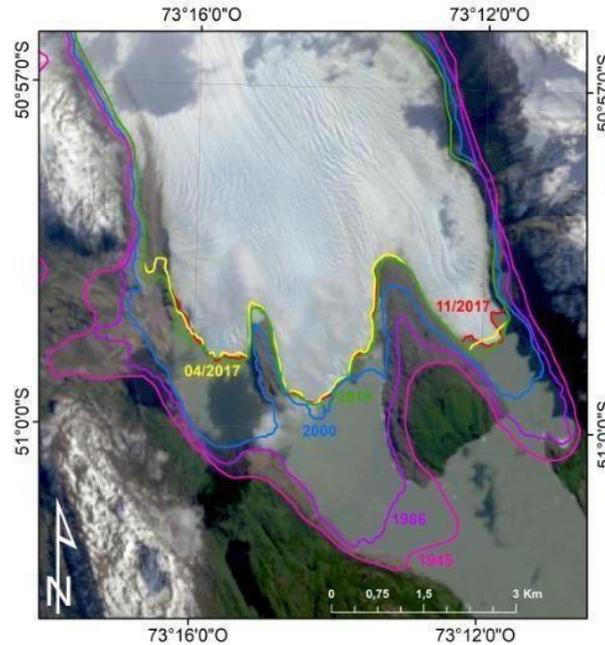


**Figura 1:** Glaciar Grey.

De acuerdo a Rivera y Casassa (2004), entre el año 1949 y 2004 el glaciar Grey perdió  $7,4 \text{ km}^2$  de superficie total, por lo tanto, al igual que en la mayor parte de los glaciares del mundo, se observa una pérdida de masa considerable que se ha ido agravando en las últimas décadas (ver figura 2).

A modo general, los glaciares que culminan en el océano o en lagos, retroceden más rápido que los glaciares terrestres debido a que en el actual escenario de cambio climático, se encuentran más propensos a la pérdida de grandes porciones de hielo por eventos de calving. De acuerdo a Sugiyama et al. (2019), los glaciares de agua dulce han recibido

menos atención en comparación a los de marea, por lo tanto, no existe tanta información acerca de los procesos que se llevan a cabo en el frente de un glaciar lacustre.



**Figura 2:** Retroceso glaciar Grey (1945 a 2017). Fuente: Laboratorio de Glaciología, 2020.

El glaciar Grey, ha sufrido variaciones frontales y ha presentado grandes cambios en su extensión, de acuerdo a Sáez (2018), entre los años 1998 y 2017, el retroceso del glaciar ha alcanzado  $10,87 \text{ km}^2$  de área y  $2,67 \text{ km}^3$  de volumen.

Este acelerado retroceso en el glaciar se encuentra relacionado directamente al incremento en la actividad de desprendimientos durante las últimas décadas, por mencionar algunos, durante el año 1997, un gran evento de calving generó una pérdida de  $1,5 \text{ km}^2$  de hielo de la parte inferior del glaciar, impidiendo la navegación en el lago durante 3 años debido a la gran cantidad de icebergs (Rivera y Casassa, 2004). En octubre del año 2016 se desprendió del frente del glaciar una superficie de  $0,021 \text{ km}^2$  de hielo (Sugiyama et al., 2019), y de acuerdo a la Fundación de Glaciares Chilenos (FGH, 2019) en noviembre del año 2017 y febrero del 2019 se perdió una superficie de  $0,13 \text{ km}^2$  y  $0,10 \text{ km}^2$  respectivamente.

Identificar la geometría del hielo subacuático en la parte delantera de los glaciares de calving o de parto es de gran utilidad para comprender la producción y el deshielo de icebergs. Bajo esa línea, un estudio de Sugiyama et al. (2019) reveló la forma del hielo subacuático en el frente del glaciar Grey a través de un sonar de barrido lateral.

Esta investigación descubrió que el hielo se extendía hacia el agua, formando una estructura similar a una terraza a varias decenas de metros de profundidad con una extensión de hasta 100 m. Dicha geometría del frente glaciar, se debe a que la temperatura de agua del lago presenta una capa cálida cercana a la superficie, lo que promueve la fusión subacuática facilitando la formación de terrazas de hielo (Sugiyama et al., 2019).

De acuerdo a Sugiyama et al. (2019), “el hielo que se extiende en el agua es flotante, y la fuerza de flotación genera torsión y una tensión de tracción en el hielo” (p.6); de acuerdo a esto, la tensión provoca una fractura en la base del glaciar, y da lugar a la formación y propagación ascendente de grietas basales.

Durante el periodo considerado en esta investigación, ocurrió un evento de calving el día 31 de octubre del año 2016, que a partir de la exposición por flotación, confirmó la estructura del hielo captada por el sonar de barrido lateral, por ende, también dejó en evidencia y demostró que la fuerza de flotación que actúa sobre el hielo desempeña un papel fundamental en eventos de desprendimientos y la producción de icebergs (Sugiyama et al., 2019).

De esta manera, ante el actual escenario de cambio climático, estos antecedentes justifican la necesidad de comprender los posibles cambios ambientales que estén ocurriendo en el área del glaciar Grey.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo General

Analizar las variaciones de área del glaciar Grey, ubicado en el Parque Nacional Torres del Paine, Región de Magallanes, mediante el uso de técnicas paleoambientales tales como la dendrocronología y las variables climáticas de temperatura y precipitación.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Determinar el crecimiento de *Nothofagus pumilio* en las inmediaciones del glaciar Grey a través de cronologías de ancho de anillos.
2. Comparar las variables climáticas de temperatura y precipitación con las cronologías de ancho de anillos de *Nothofagus pumilio*.
3. Relacionar las variables climáticas con los cambios de área del glaciar Grey.

## 1.5 HIPÓTESIS

Considerando lo mencionado anteriormente, esta investigación propone como hipótesis que, en el actual escenario de cambio climático, con el aumento de temperaturas y la disminución de precipitaciones en Patagonia, se podría visualizar un aumento en el crecimiento de ancho de anillos de *Nothofagus pumilio* y una disminución en el área de cobertura del glaciar Grey.

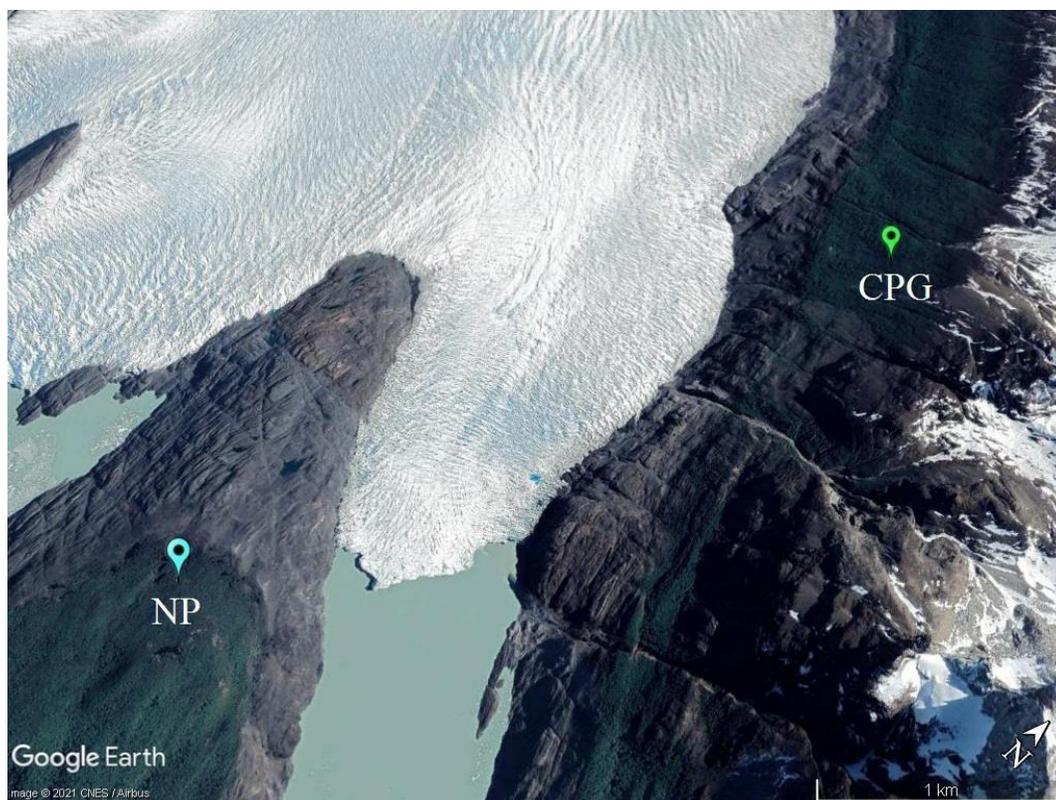
## CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

### 2.1 DENDROCRONOLOGÍA

#### 2.1.1 Colecta de muestras en terreno

Para llevar a cabo la presente investigación, se tomaron muestras aleatorias de *Nothofagus pumilio* en dos sitios diferentes dentro del área del glaciar Grey, que se detallan a continuación.

El primer sitio corresponde a la morrena lateral del glaciar (ver figura 3) con latitud  $50^{\circ}57'26''$  S y longitud de  $73^{\circ}11'44''$  O. En este lugar, los árboles de lenga presentaban ciertas características, asociadas a mayor antigüedad, troncos rectos, altos y grandes, llegando a una altura aproximada de 15 a 20 mts.



**Figura 3:** Sitios de muestreo. El área de muestreo de la morrena lateral ( $50^{\circ}57'26''$ S -  $73^{\circ}11'44''$ O) se encuentra en el marcador verde (CPG), mientras que el Nunatak ( $50^{\circ}59'32''$ S -  $73^{\circ}12'40''$ O) en el marcador celeste (NP).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos disponibles en Google Earth Pro, 2021.

Mientras que por otro lado, en el segundo sitio (ver figura 3) correspondiente al Nunatak del glaciar (latitud 50°59'32"S y longitud de 73°12'40"O), se encontraban árboles no muy altos, con una altura que va desde los 5 a 10 mts, con condiciones sanitarias no muy buenas, por lo que, se deduce que en este sitio el bosque se encontraba en condiciones estresadas por un posible contacto reciente con el glaciar.

Las muestras utilizadas para el desarrollo de las cronologías, fueron colectadas el año 2015 a través del uso de una barrena de Pressler de 5,0 mm de diámetro (se obtuvo 2 muestras por árbol). A las muestras colectadas en la morrena lateral (20 en total) se les asignó el código CPG, mientras que a las extraídas en el Nunatak (15 en total), el código NP.

### 2.1.2 Preparación de las muestras

Tras la extracción de las muestras, estas fueron procesadas siguiendo la metodología de Stokes y Smiley (1968), por lo tanto, se montaron en soportes de madera rígidos y fueron pulidas usando lijas de madera (desde granos gruesos a finos), hasta lograr la mejor resolución posible de los anillos de crecimiento y facilitar el reconocimiento e identificación de estos.

### 2.1.3 Conteo de anillos y fechado visual

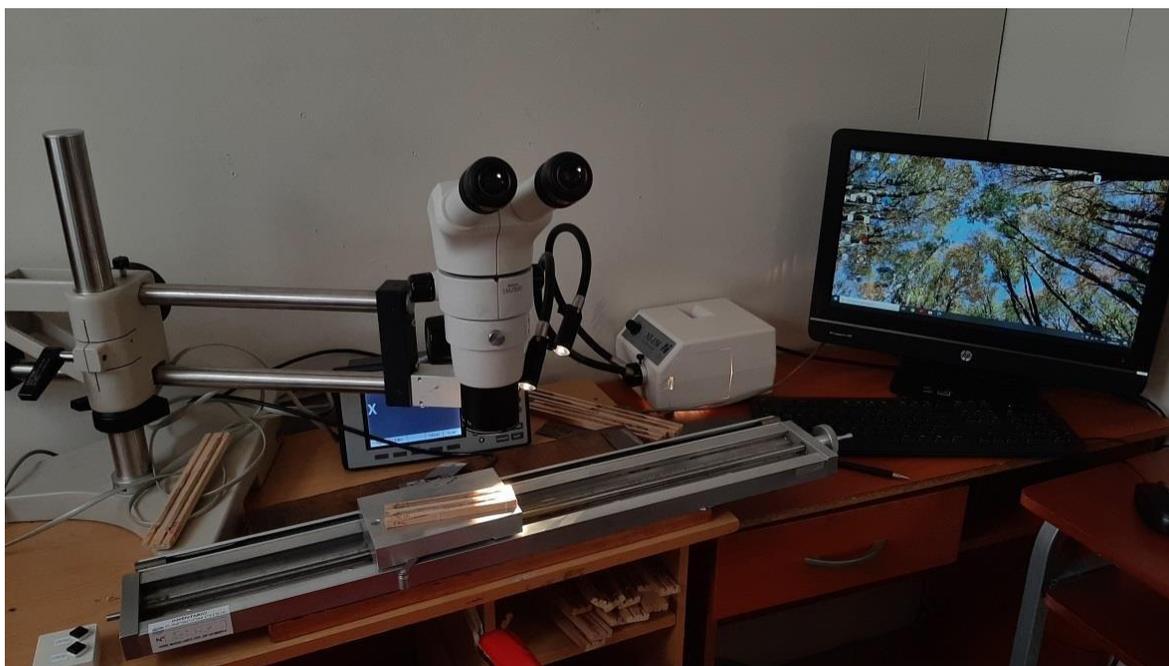
Con las muestras ya preparadas para la observación visual, para estimar la edad inicial del árbol se procedió al conteo de anillos a través del uso de una lupa binocular Nikon SMZ800, herramienta que facilitó enormemente el fechado visual de las secuencias de anillos. En esta etapa se comenzó a contar los anillos hacia atrás a partir del anillo más recientemente formado, de edad conocida, de manera que al llegar al último anillo, se obtuvo la edad total del árbol, cada década fue marcada con un punto, la mitad de siglo con dos puntos y los siglos con tres puntos, para facilitar el proceso de medición.

En esta investigación, se utilizó la convención de Schulman (1956) para el hemisferio sur, la cual, “asigna a cada anillo de crecimiento el año en que se inició el crecimiento” (Urrutia, 2002, p.12). Por lo tanto, como las muestras fueron colectadas el año 2015 (y el anillo estaba en crecimiento), se consideró como último año completamente formado el 2014, por lo tanto, se comenzó a contar desde ese año hacia el pasado, hasta llegar al último anillo de cada muestra.

## 2.1.4 Construcción de las cronologías de *Nothofagus pumilio*.

### 2.1.4.1 Medición de anillos

Para medir el ancho de cada anillo, se utilizó un dendrómetro VELMEX Inc. (ver figura 4), cuya precisión es de 0,01 mm. Esta herramienta consta de un carro que desplaza la muestra y un contador que mide el ancho de anillos mediante un registrador manual, que se encuentra conectado a un computador, enviando la información a Measure J2X, programa que sirve para medir nuevas o editar series existentes de anillos de árboles, y que además permite la captura de medidas de una variedad de unidades de etapa de medición, codificación y lectura digital (VoorTech, 2020). Este programa, permite guardar las mediciones en un archivo en formato RAW, el cual, es compatible para utilizarlo en el software llamado Dendrochronology Program Library (DPL), específicamente con la herramienta de análisis COFECHA (Holmes, 1983).



**Figura 4:** Lupa binocular Nikon SMZ800 y dendrómetro VELMEX Inc. Fuente: Captura propia, 2020.

### 2.1.4.2 Programa COFECHA (Holmes, 1983)

Para generar una cronología de ancho de anillos sin errores y de buena calidad para cada sitio, se realizó una datación cruzada a través del software llamado Dendrochronology Program Library (DPL), específicamente con la herramienta de análisis COFECHA (Holmes, 1983).

Debido a que se tomaron 2 muestras por árbol (en cada sitio de muestreo), como primer paso, se midieron las muestras hermanas y se hizo el cálculo de correlación entre estas series de anillos, con el objetivo de identificar el grado de sincronía entre ambas muestras. En esta investigación, se consideró como buena sincronización entre series de anillos, cuando la correlación entre ellas era igual o mayor que 0,5.

De esta manera, una vez realizada la medición de todas las muestras CPG Y NP, se utilizó el programa COFECHA para analizar y corregir todas las series medidas, las que se promediaron para obtener la cronología maestra de cada sitio. Cada cronología fue analizada en segmentos de una longitud de 100 años con traslapes de 50 años, lo que permitió corregir errores de fechado o medida, así como también identificar anillos ausentes o falsos (Fritts, 1976; Urrutia, 2002).

#### 2.1.4.3 Estandarización

De acuerdo a Urrutia (2002), “el ancho de los anillos puede variar tanto por las fluctuaciones en las condiciones ambientales, como también por cambios sistemáticos en la edad del árbol, la altura del tronco y las condiciones de productividad del sitio” (p.17). Bajo esa línea, con el objetivo de remover el “ruido” de dichos efectos, luego de medir y cofechar, se procedió a realizar una estandarización de las series.

La estandarización es un método que consiste en ajustar la serie de crecimiento de cada árbol individual a una curva adecuada, de forma de remover los efectos producidos por la disminución del crecimiento del árbol con la edad o cambios en la geometría del árbol (Ruiz, 2020; Urrutia, 2002). Para los efectos de esta investigación, al ser un estudio dendroclimático, las cronologías fueron estandarizadas con 3 métodos (curva exponencial negativa, spline y mean), con el objetivo de determinar la que mejor se ajuste o se correlacione con la variables climáticas.

Luego de estandarizar todas las muestras individuales y obtener una serie promedio para cada sitio de muestreo, se desarrollaron las cronologías estándar y residual de los anchos de anillos, a través del uso del paquete dendrocronológico de la biblioteca del programa de dendrocronología en R (dplR), el cual, lee archivos de anillos de árboles estándar de formato decadal y permite realizar análisis y gráficos (Bunn, 2008).

De acuerdo a Ruiz (2020), la cronología estándar es el “resultado de la estandarización de las series individuales de ancho de anillos a través de una media robusta, de la cual se remueve la varianza no atribuida al clima y se promedia para obtener una cronología maestra” (p.14). Mientras que, la cronología residual, es calculada a partir de valores residuales del modelo de autoregresión donde una vez ajustadas las curvas de crecimiento,

son promediados estadísticamente obteniendo la cronología (Llancabure, 2011), en este punto, se elimina la autocorrelación de la cronología (correlación del ancho de anillo de un año determinado, con el ancho del anillo o de los años posteriores), por lo tanto, esta presenta una uniformidad semejante en la varianza a lo largo del tiempo. Ambas cronologías son de gran utilidad, sin embargo, en la presente investigación, se utilizó la cronología estándar de las muestras para los análisis.

#### 2.1.4.4 Señal expresada de la población (EPS)

Además de lo mencionado anteriormente, el paquete dplR ofrece otras posibilidades de evaluar la calidad de una cronología, puesto que entrega otros resultados estadísticos, tales como la señal expresada de la población (EPS), la cual, es una medida de la confianza de señal común entre muestras (se puede expresar como una proporción de la varianza común a la varianza total de la cronología), cuando esta alcanza un valor mayor a 0,85, significa que a partir de ese año la cronología posee fiabilidad, en otras palabras, desde ese año se considera adecuado reflejar una señal común de crecimiento (Wigley et al., 1984).

#### 2.1.4.5 Análisis espectral

Por último, se realizó un análisis del poder espectral de la series de anillos de árboles CPG y NP, a través de un método no paramétrico que reduce la varianza del espectro, entregando niveles de confianza del 90%, 95% y 99%. Y para complementar esta caracterización del poder espectral de las muestras, se obtuvo un análisis Wavelet, el cual, permite identificar y obtener las periodicidades más significativas para todo el intervalo de tiempo de las series de muestras de anillos (Torrence y Compo, 1998).

## 2.2 VARIABLES CLIMÁTICAS Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS PARA ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO

Desde la página del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia ((CR)2), se recopilaron los datos de registros meteorológicos de temperatura media mensual y precipitación media mensual, provenientes de las estaciones ubicadas en Torres del Paine (51°10'29''S, 72°57'14''O), Puerto Natales (51°44'21''S, 72°27'34''O) y Punta Arenas (53°9'10''S, 70°55'35''O), siendo esta última la que posee el registro de datos mensuales más amplio (temperatura desde 1966 y precipitación desde 1950 al presente), con periodos mínimos sin datos (Tabla 1).

Debido a que algunas de las estaciones mencionadas presentan datos faltantes de temperaturas y precipitaciones en sus registros, se utilizaron datos grillados para completar estos vacíos. Por lo tanto, en este estudio se utilizaron los registros climáticos de tres estaciones que varían entre las latitudes 51°-53°S, los datos grillados de donde se encuentran ubicadas las estaciones y los datos grillados del glaciar Grey (Tabla 2).

**Tabla 1:** Descripción de estaciones climáticas usadas en el análisis dendroclimático.

Dirección General de Aguas (DGA) y Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Estación Meteorológica	Variable (mensual)	Periodo	Fuente
Punta Arenas	Temperatura	1966 al 2014	DMC
	Precipitación	1950 al 2014	
Puerto Natales	Temperatura	2012 al 2014	DGA
	Precipitación	1986 al 2014	
Torres del Paine	Temperatura	1982 al 2014	
	Precipitación		

El CRU TS (Climatic Research Unit gridded Time Series) de acuerdo a Harris et al. (2020) “es un conjunto de datos climáticos ampliamente utilizado en una cuadrícula de 0,5° de latitud por 0,5° de longitud en todos los dominios terrestres del mundo excepto la Antártida” (p.1). Estas series temporales cuadrículadas se obtienen mediante la interpolación de anomalías climáticas mensuales a partir de amplias redes de observaciones de estaciones meteorológicas; en este estudio se utilizó la versión CRU TS v4, la cual abarca un periodo desde el año 1901 al 2018.

**Tabla 2:** Descripción datos grillados utilizados en este estudio.

Datos Grillados	Ubicación	Variable (mensual)	Periodo	Fuente
50.75 S 73.25 O	Glaciar Grey	Temperatura	1920 al 2014	CRU TS Version 4.04 Google Earth Interface
		Precipitación		
51.25 S 72.75 O	Torres del Paine	Temperatura	1982 al 2014	
		Precipitación		
51.75 S 72.25 O	Puerto Natales	Temperatura	1986 al 2014	
		Precipitación		
53.25 S 70.75 O	Punta Arenas	Temperatura	1966 al 2014	
		Precipitación	1950 al 2014	

## 2.3 DENDROCLIMATOLOGÍA

Para realizar el análisis de las cronologías de ancho de anillos y su relación con el clima, se trabajó con funciones de correlación entre las cronologías estándar y las anomalías mensuales de temperatura y precipitación de los datos grillados del glaciar Grey y las estaciones de Torres del Paine, Puerto Natales y Punta Arenas.

De esta manera, para identificar las variables climáticas que presentaban una mayor correlación con las cronologías estándar, se utilizaron las herramientas Routine RespoAverage y Routine RespoSum, desarrolladas por Mariano Masiokas, las cuales, realizan los análisis a través de una ventana temporal de 41 meses, seleccionando el conjunto de datos en periodos móviles de 1 a 12 meses, comenzando en enero del segundo año calendario anterior (t-2) y terminando en mayo del año dendrocronológico actual para el hemisferio sur (t+1), por lo tanto, permiten considerar todas las combinaciones de meses posibles con un desfase de hasta 2 años.

### 2.3.1 Relación con la temperatura

Para identificar la relación entre el crecimiento de *Nothofagus pumilio* y la temperatura (variable no aditiva), se utilizó la herramienta Routine RespoAverage, la cual, toma los datos mensuales de temperatura correspondientes a cada año y calcula el promedio para las diferentes combinaciones de meses.

De esta manera, en base al coeficiente de correlación de Pearson se compararon los valores obtenidos con las cronologías de ancho de anillos y se escogieron las combinaciones de meses que presentaron los mejores coeficientes de correlación.

### 2.3.2 Relación con la precipitación

La herramienta Routine RespoSum, por otro lado, permitió identificar la relación entre la precipitación (variable aditiva) y el crecimiento de los árboles. De ese modo, se tomaron los datos mensuales de precipitaciones correspondientes a cada año y se calculó la sumatoria para las diferentes combinaciones de meses. Y al igual que en el caso de las temperaturas, en base al coeficiente de correlación de Pearson se escogieron aquellas combinaciones de meses que presentaron los mejores valores.

Finalmente, para exponer los resultados dendroclimáticos obtenidos y verificar visualmente las relaciones encontradas, se volvió a calcular el coeficiente de correlación de Pearson por medio del programa Excel, pero esta vez en términos de sus anomalías estandarizadas, en este sentido, el utilizar las anomalías de las variables permitió verificar su correlación no sólo numéricamente, sino que gráficamente también.

### 2.4 CAMBIOS EN EL ÁREA DEL GLACIAR GREY

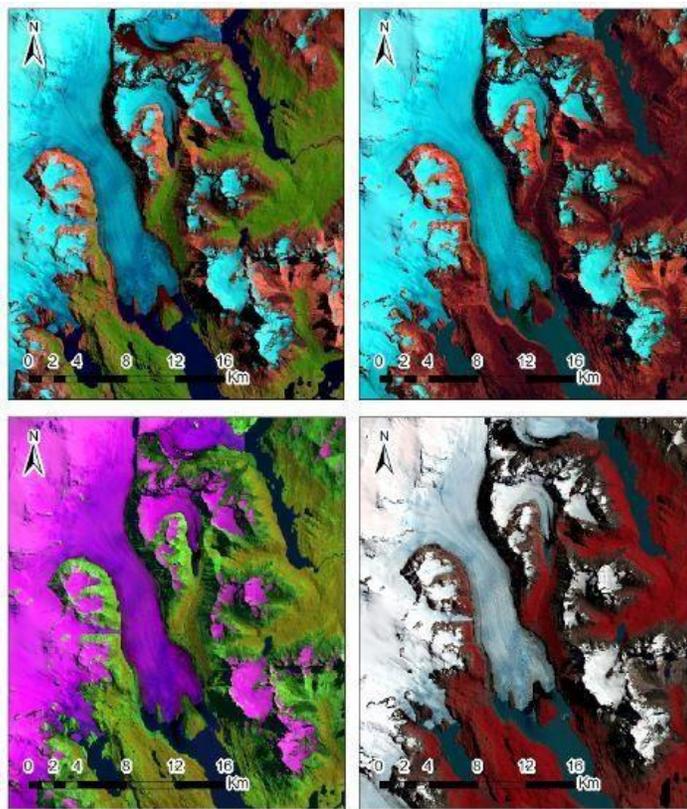
En cuanto a los análisis de la variación del área del glaciar Grey, una vez realizados los estudios dendroclimáticos, se realizó la delimitación y digitalización manual del contorno de la cuenca del glaciar Grey para diferentes años a partir del uso de imágenes satelitales provenientes de las misiones *Landsat 2, 4, 5 y 8*, descargadas de forma gratuita a través de *Google Earth Engine*, plataforma que facilita el análisis científico y la visualización de conjuntos de datos geospaciales y el buscador *Earth Explorer* de la USGS, plataforma que posee un registro completo de las misiones a cargo de la NASA, ESA y otras instituciones afines (Sáez, 2018; Perilla y Mas, 2020).

**Tabla 3:** Imágenes satelitales glaciar Grey.

Fecha	Imágenes Satelitales	Fuente
02-01-1979	Landsat 2	Google Earth Engine y USGS
30-09-1984	Landsat 5	
06-10-1986		
19-08-1989	Landsat 4	
14-04-1998	Landsat 5	
29-09-2001		
19-02-2005		
14-09-2007		
20-02-2011	Landsat 8	
19-10-2014		
29-09-2016		
06-02-2020		

Para obtener dichas imágenes se consideró que estas presentaran un porcentaje de nubosidad inferior a 30% para facilitar la observación del estado del glaciar; de esta manera, la mayoría de las imágenes utilizadas corresponden a las obtenidas en meses de primavera/verano, puesto que en estas épocas del año se produce el máximo deshielo glaciar y la menor nubosidad atmosférica (Tabla 3).

Una vez seleccionadas las imágenes, para resaltar la cobertura del hielo y facilitar la digitalización manual se utilizaron las combinaciones de bandas 743, 731, 432 y 451 para las imágenes *Landsat 4-5* (ver figura 5), y para las imágenes *Landsat 8*, las combinaciones de bandas 754, 742, 543 y 562 (Bravo, 2017). De este modo, tanto el procesamiento de las imágenes como la digitalización del glaciar (a escala 1:10.000), se llevaron a cabo mediante el software ArcGIS 10.5, para luego calcular el área total del glaciar y la tasa de retroceso de los periodos de estudio.



**Figura 5:** Combinación de bandas para imagen satelital Landsat 8 glaciar Grey año 2020. (a)754 (b)742 (c)562 (d)543. Para ver la aplicación o descripción de estas combinaciones ver anexo 3.

Como se mencionó en páginas anteriores, el glaciar Grey corresponde a una lengua sureste de los Campos de Hielo Sur; esta condición hace que a diferencia de las caras laterales y frontales, la zona superior no se encuentre totalmente definida al estar unida a la plataforma de CHS (Rivera y Casassa, 2004; Sáez, 2018).

Con el objetivo de estimar correctamente los cambios en el área del glaciar, se contempló la zona de acumulación y ablación del glaciar, de esta forma, para tener una referencia de como delimitar la cuenca a través de la fotointerpretación se utilizó el Inventario Público de Glaciares de la DGA (IPG, 2014), el cual, posee una delimitación correspondiente a una imagen del año 2002 y también se consideró a Rivera et al. (2017) para validar las delimitaciones llevadas a cabo por esta memoria.

De esta manera, tras la digitalización del glaciar Grey para cada año considerado (entre 1979 y 2020), se calculó el área en  $\text{km}^2$  y posteriormente, se calcularon las tasas de retroceso de este, en base a la metodología de Ruiz (2020), que consiste en restar el área del glaciar en el año final con el área del año inicial del periodo considerado, dividido en el año final menos el año inicial del periodo (ver anexo 4).

#### 2.4.1 Relación de variables climáticas con las áreas y tasas de retroceso del glaciar Grey

Como se mencionó en páginas anteriores, los registros temporales de las variables climáticas en zonas cercanas al glaciar Grey, no son longevos ni completos, debido a la escasez de estaciones meteorológicas y la falta de datos en sus registros (Castellano, 2017; Ruiz, 2020). Bajo esa línea, para poder relacionar las variables climáticas con los cambios de área del glaciar Grey, se recopilieron datos climáticos de precipitación media mensual y de temperatura media, máxima y mínima mensual desde el repositorio TerraClimate alojado en la Red de Conocimiento del Noroeste de la Universidad de Idaho (Abatzoglou et al., 2018).

TerraClimate, combina las normales climatológicas de alta resolución espacial del conjunto de datos WorldClim, con datos de resolución espacial más gruesa, pero variables en el tiempo, de la Unidad de Investigación Climática versión 4.0 (CRU Ts4.0) y del Reanálisis japonés de 55 años (JRA55), para crear un conjunto de datos de alta resolución espacial que cubre un registro temporal más amplio (Abatzoglou et al., 2018; Fuentealba et al., 2021). Todos los datos tienen una resolución temporal mensual y una resolución espacial de  $\sim 4 \text{ km}$  ( $1/24^\circ$  grado) y actualmente, cubren el período comprendido entre 1958 y 2020 (ClimatologyLab, 2021).

En base a la información disponible más cercana al glaciar Grey, para los efectos de la presente memoria, se consideraron los datos que cubren desde el año 1979 al 2020. Para finalmente, comparar las variables climáticas (precipitación y temperatura) con las tasas de retroceso y la cobertura del glaciar Grey (área) a través de la correlación de Pearson. Por lo tanto, con este método, se determinó si existe o no una relación directa entre las variables durante el periodo de estudio (41 años).

## CAPÍTULO 3: RESULTADOS

### 3.1 CRECIMIENTO DE *NOTHOFAGUS PUMILIO* EN LAS INMEDIACIONES DEL GLACIAR GREY A TRAVÉS DE CRONOLOGÍAS DE ANCHO DE ANILLOS.

#### 3.1.1 Muestras CPG

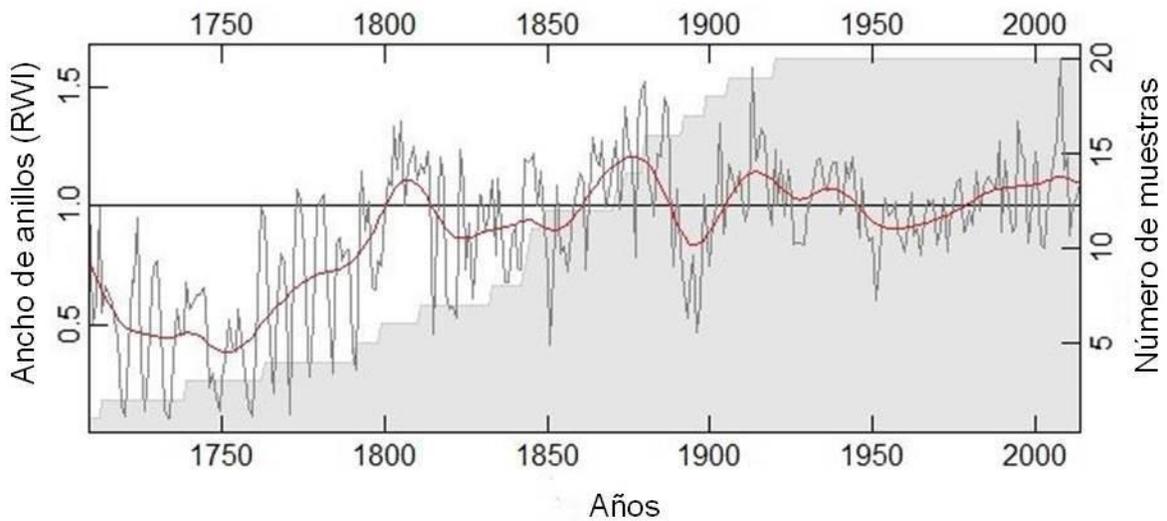
La primera cronología obtenida corresponde a la morrena lateral (CPG), en donde se consideraron 20 muestras. Esta serie maestra posee un rango temporal de 307 años que va desde 1709 al 2014, con una intercorrelación entre las series determinada por un coeficiente de correlación de Pearson de 0,597 y una sensibilidad media de 0,244, valor que indica el cambio de porcentaje medio de la variabilidad del crecimiento de un año a otro. Además, también, se identificaron 4 segmentos con posibles problemas, sin embargo, al revisar la serie se comprobó que se trataba de segmentos de 50 años con una baja correlación y no de problemas de cofechado (Tabla 4).

**Tabla 4:** Resultados muestras CPG en COFECHA.

C	Número de datos	20
O	Serie maestra 1709 - 2014	307 años
F	Total anillos en toda la serie	3643
E	Total de anillos fechados	3639
C	Intercorrelación	0,597
H	Sensibilidad media promedio	0,244
A	Segmentos con posibles problemas	4

Como se mencionó en páginas anteriores, en este estudio las cronologías fueron estandarizadas con 3 métodos (curva exponencial negativa, spline y mean), con el objetivo de encontrar la que mejor se ajustara o se correlacionara con las variables climáticas.

En el caso de las muestras CPG, la cronología se ajustó a una curva exponencial negativa, debido a que esta estandarización refleja el comportamiento clásico de disminución del ancho de anillos debido al envejecimiento del árbol, cuando los factores de competencia y disturbios locales son mínimos (Aliste, 2016; Fritts, 1976). De esta manera, la curva estandarizada presenta una media igual a 1 y una varianza homogénea a lo largo de los años.

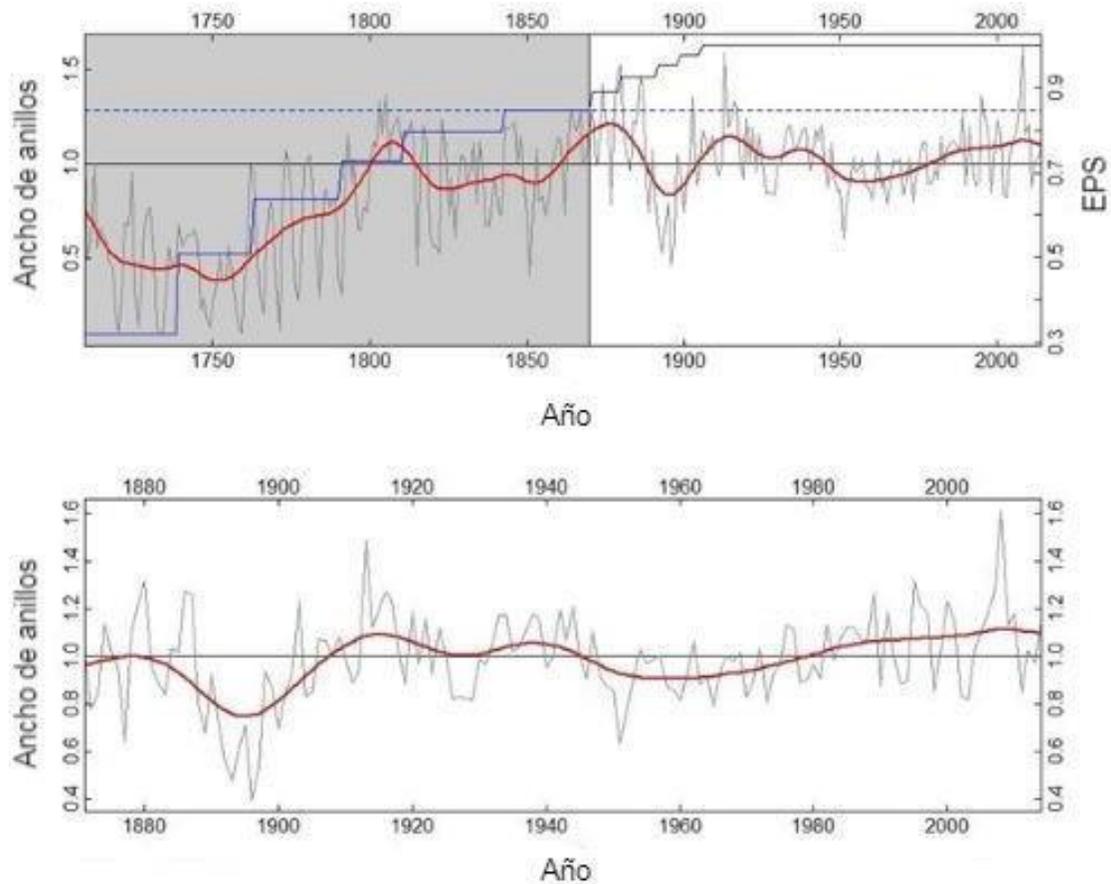


**Figura 6:** Cronología estándar de la morrena lateral del glaciar Grey. En el eje Y izquierdo: índice de ancho de anillos, eje Y derecho: número total de muestras.

Tras la estandarización de las series individuales de anchos de anillos a través de una media robusta, se obtuvo la cronología estándar de índices de crecimiento arbóreo, la cual, presenta más de 5 muestras por año a partir del año 1799 (figura 6). Si bien, se ve un patrón de crecimiento bajo entre el año inicial 1709 y 1800, es difícil sacar mayores conclusiones para ese periodo temporal debido a la poca cantidad de muestras que logran llegar a esos años. Sin embargo, a medida que nos acercamos al presente este índice comienza a disminuir su variación sobre y bajo la media.

Para evaluar la calidad de la cronología estándar se utilizó la señal expresada de la población (EPS), medida de la confianza de señal común entre muestras que fue calculada sobre una ventana de 50 años con una superposición de 25 años. Para el caso de las muestras de la morrena (CPG), la EPS de la cronología estándar presentó un valor  $> 0,85$  a partir del año 1870, esto indica que a partir de dicho año la cronología tiene una buena estabilidad temporal y por ende, es un periodo confiable con una fuerte señal de crecimiento común para los últimos 144 años.

En el gráfico superior de la figura 7, se encuentra la cronología estándar incluyendo la señal expresada por la población EPS (en gris los valores inferiores a 0,85), mientras que en el de abajo, se encuentra el corte de EPS  $>0,85$  desde el año 1870, por lo tanto, en la parte inferior de la figura, se puede observar la serie maestra obtenida de las muestras de *Nothofagus pumilio* pertenecientes a la morrena lateral del glaciar Grey.

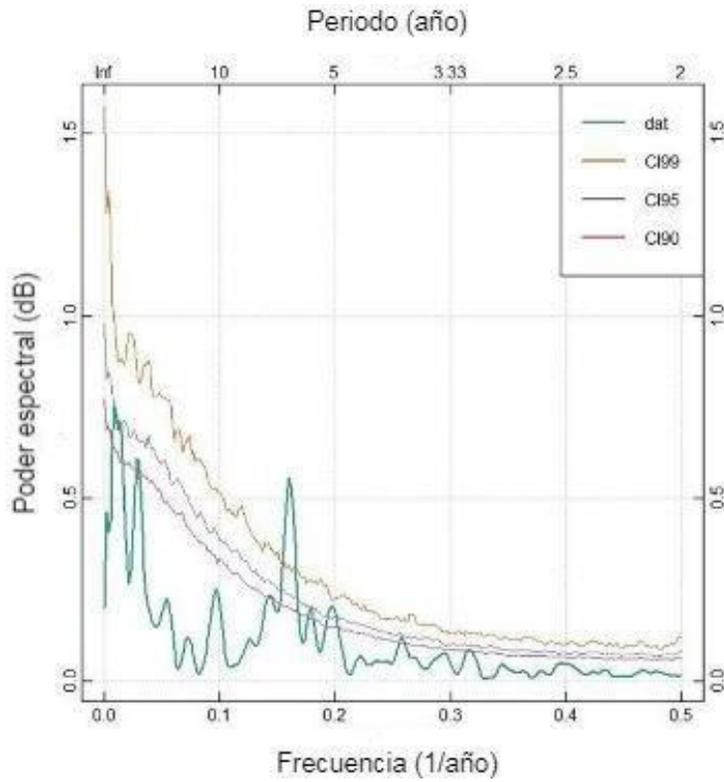


**Figura 7:** Cronología truncada para muestras CPG. En el eje Y izquierdo el índice de ancho de anillos, en el eje Y derecho, la señal expresada por la población (EPS).

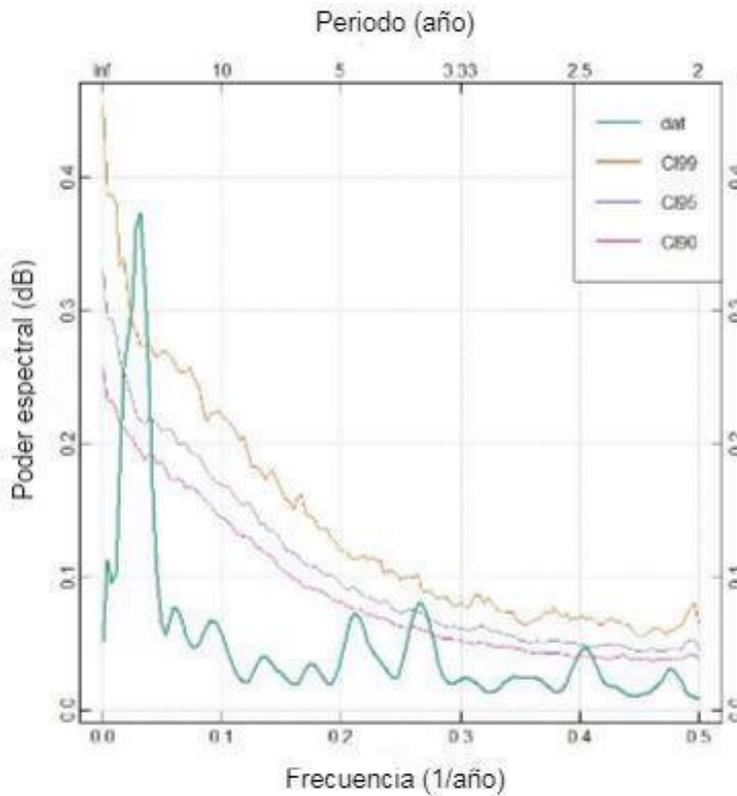
A partir de la figura 7, considerando que la cronología es confiable a partir del año 1870 se puede observar que el ancho de anillos sigue una tendencia bajo la media entre los años 1890 a 1900, posteriormente se acerca a la media y desde el año 1960 en adelante comienza a visualizarse un incremento en el ancho de anillos hasta el año 2010, con un leve decrecimiento hacia el final del año en estudio (2014).

Además, por medio del paquete de dendrocronología en R (dplR), se analizó el poder espectral de la serie de anillos de árboles CPG, correspondiente al periodo de tiempo que va desde el año 1709 al 2014 (figura 8), en donde se puede ver una frecuencia dominante que sobrepasa el límite de confianza del 95% y 99% para un periodo de 7 años.

Sin embargo, al analizar el poder espectral de la cronología a partir de 1870, dada la confiabilidad de la señal expresada por la población (EPS) en la figura 9, se visualiza una frecuencia dominante por sobre el nivel de confianza del 90% y sobrepasando el nivel de confianza de 95% para un periodo de 4 años aproximadamente.



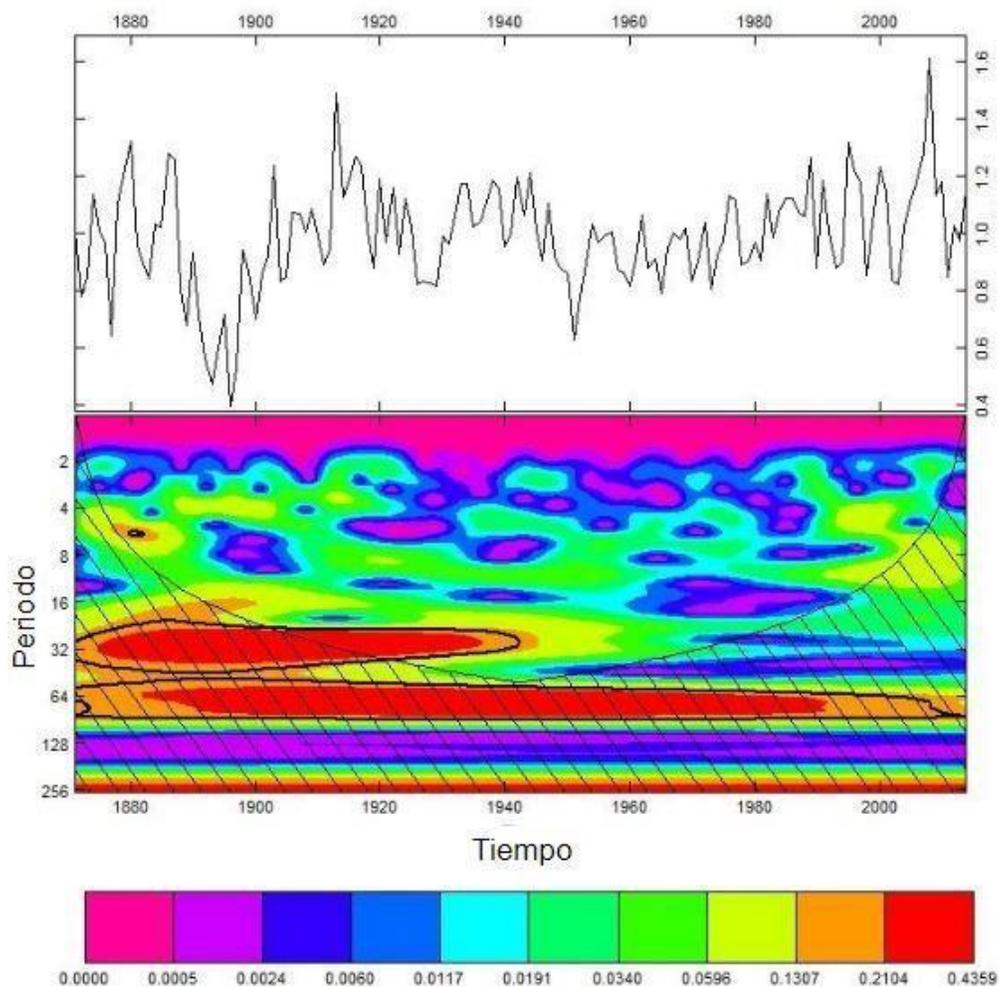
**Figura 8:** Espectro de frecuencia dominante de la cronología desde el año 1709 al 2014. En verde cronología muestras CPG, límite de confianza (LC) naranja 99%, morado 95% y fucsia 90%.



**Figura 9:** Espectro de frecuencia dominante de la cronología desde el año 1870 al 2014. En verde cronología muestras CPG, límite de confianza (LC) naranja 99%, morado 95% y fucsia 90%.

Por otro lado, en la figura 10, se encuentra el análisis espectral del método Multitaper, en tonos cálidos, tales como los amarillos, naranjos y rojos, la señal espectral es más fuerte, mientras que en tonos fríos, como el fucsia o azul la señal más débil. Cuando la señal espectral posee un contorno en color negro, significa que posee un nivel de confianza del 95%, por lo tanto, indica una alta significancia estadística.

De acuerdo a Ruiz (2020), “al utilizar este análisis se pueden identificar las periodicidades más significativas para todo el intervalo de tiempo de las series de muestras de anillos” (p.15). Para el caso de la serie maestra obtenida de las muestras CPG ubicadas en la morrena lateral del glaciar Grey, se observa una señal cíclica en la cronología que va entre 4 y 6 años entre los años 1880 y 1890 y otro periodo por sobre la media, entre los años 1910 y 1940 aproximadamente.



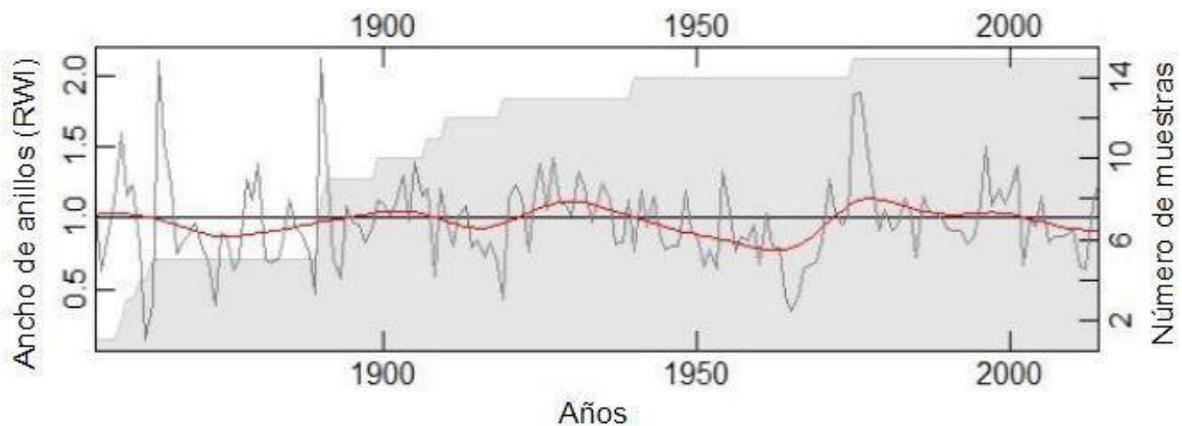
**Figura 10:** Análisis Wavelet de la cronología de la morrena lateral (1870 a 2014).

### 3.1.2 Muestras NP

La segunda cronología obtenida corresponde al sitio de muestreo del Nunatak del glaciar Grey (NP), en donde se consideraron 15 muestras, que dieron como resultado un rango temporal de 161 años (desde 1854 al 2014) con una intercorrelación entre estas series determinada por un coeficiente de correlación de Pearson de 0,705 y una sensibilidad media de 0,297 (Tabla 5).

**Tabla 5:** Resultados muestras NP en COFECHA.

C	Número de datos	15
O	Serie maestra 1854 - 2014	161 años
F	Total anillos en toda la serie	1819
E	Total de anillos fechados	1815
C	Intercorrelación	0,705
H	Sensibilidad media promedio	0,297
A	Segmentos con posibles problemas	0



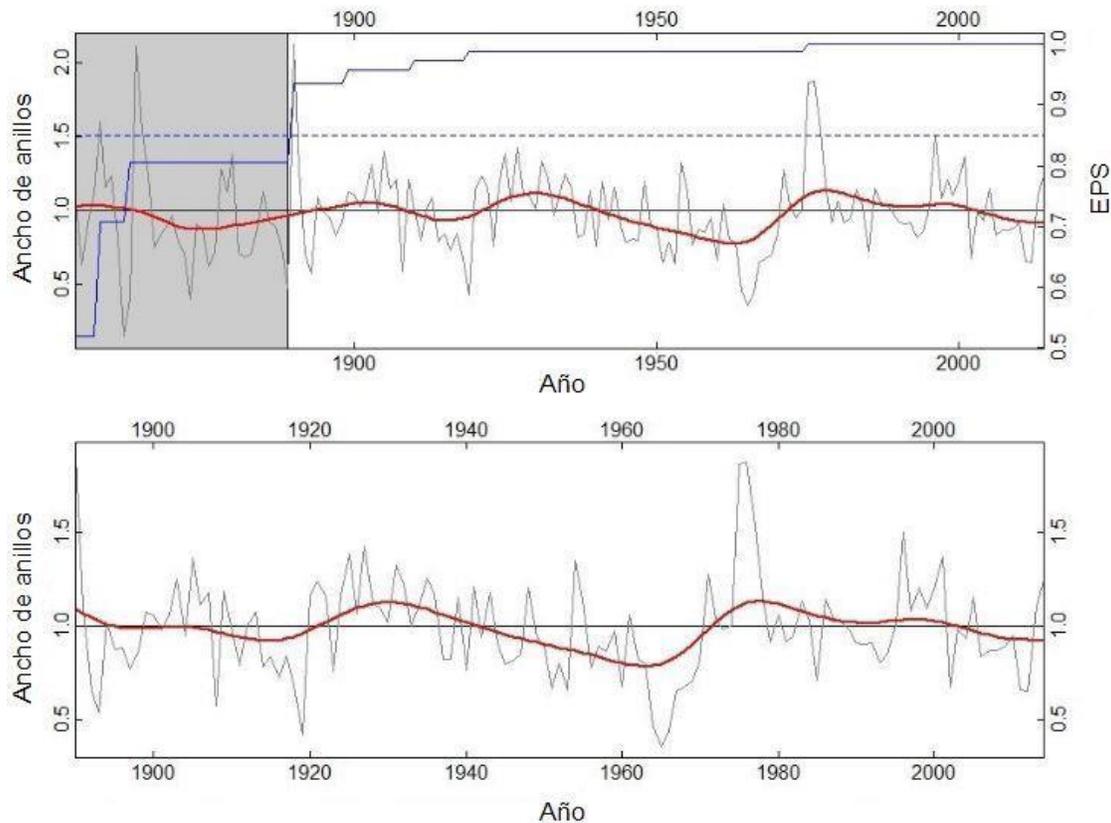
**Figura 11:** Cronología estándar del Nunatak del glaciar Grey. En el eje Y izquierdo: índice de ancho de anillos, eje Y derecho: número total de muestras.

A diferencia de las muestras CPG, las variables climáticas se correlacionaron mucho mejor con la cronología obtenida para el Nunatak ajustada a una curva flexible suavizada (Spline).

De acuerdo a Ribas (2006), “la longitud de la función spline ajustada a las series de crecimiento brutas debe de ser suficientemente flexible para eliminar los cambios en el crecimiento radial de los árboles debidos a la dinámica forestal y al régimen de perturbaciones” (p.36). Pero también, debe ser lo suficientemente rígida para conservar la mayor parte de la variabilidad de media y la alta frecuencia (vinculadas al clima), bajo esa línea, para los efectos de esta investigación se usó un spline de 30 años.

En la figura 11, se puede observar la cronología estándar de índice de crecimiento arbóreo obtenida a partir de la medición de todas las muestras NP, la cual, presenta más de 5 muestras por año a partir del año 1890. Sin embargo, tal como se expresó en las páginas anteriores, para confirmar la calidad y fiabilidad de las cronologías se utilizó la señal expresada de la población (EPS).

En el caso de las muestras correspondientes al Nunatak, a partir del año 1890, la EPS presentó un valor mayor a 0,85, por lo tanto, la cronología posee una buena estabilidad temporal y una fuerte señal de crecimiento en común para los últimos 124 años.

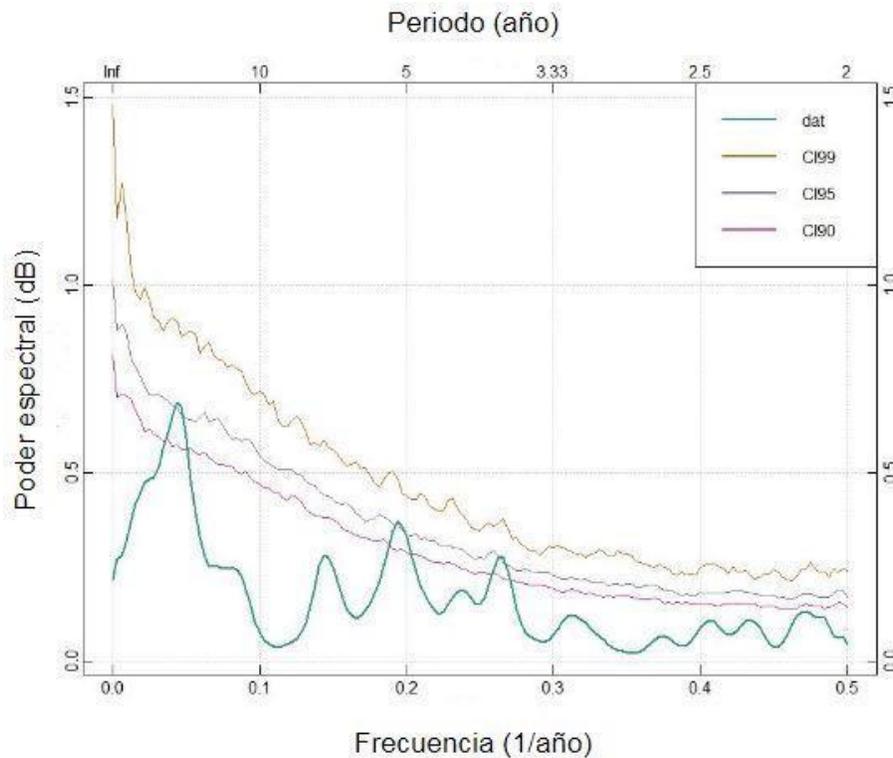


**Figura 12:** Cronología truncada para muestras NP. En el eje Y izquierdo: el índice de ancho de anillos, en el eje Y derecho: la señal expresada por la población (EPS).

En la parte superior de la figura 12, se encuentra la cronología estándar incluyendo la señal expresada por la población EPS (en gris los valores inferiores a 0,85), mientras que abajo, se encuentra el corte de EPS  $>0,85$  desde el año 1890, por lo tanto, en la parte inferior de la figura, se puede observar la cronología obtenida de las muestras de *Nothofagus pumilio* pertenecientes al Nunatak del glaciar Grey. En esta cronología se observa una tendencia bajo la media entre los años 1950 a 1970, que posteriormente se acerca a la media y aumenta hacia 1980, sin embargo, desde dicho año el ancho de anillos presenta un marcado

acercamiento a la media mientras que desde el 2000 en adelante se visualiza una clara disminución en el crecimiento de anillos hasta el final del año en estudio 2014.

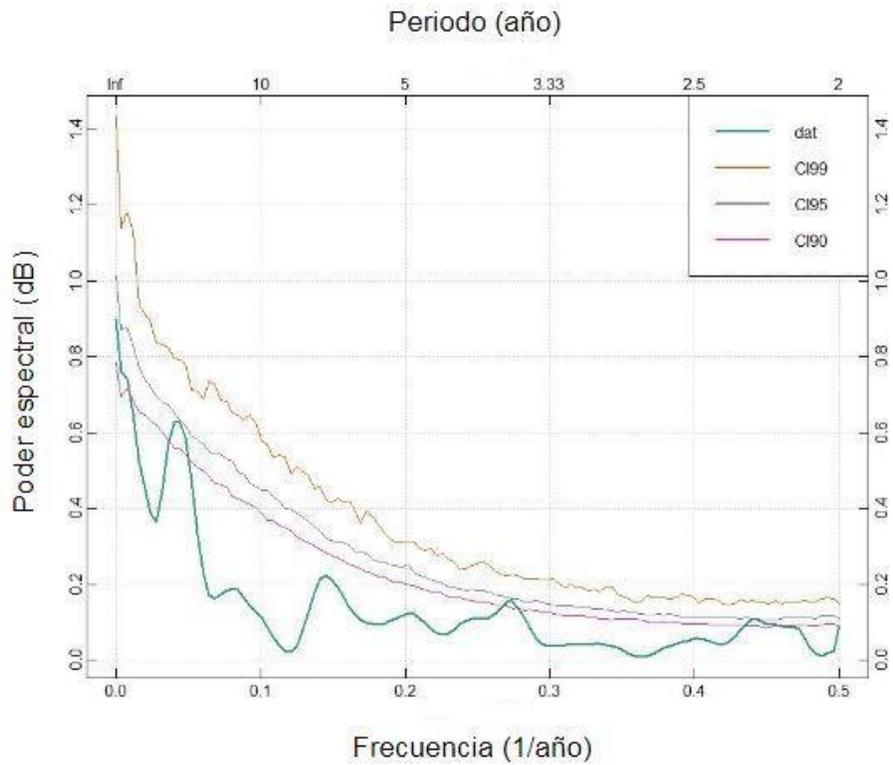
Al analizar el poder espectral de la serie de anillos de árboles de la figura 13 (desde el año 1854 al 2014), se pueden ver las frecuencias dominantes, las cuales, sobrepasan el límite de confianza del 90% y 95% para periodos que van de los 6 a 5 años y desde 4 a 3 años.



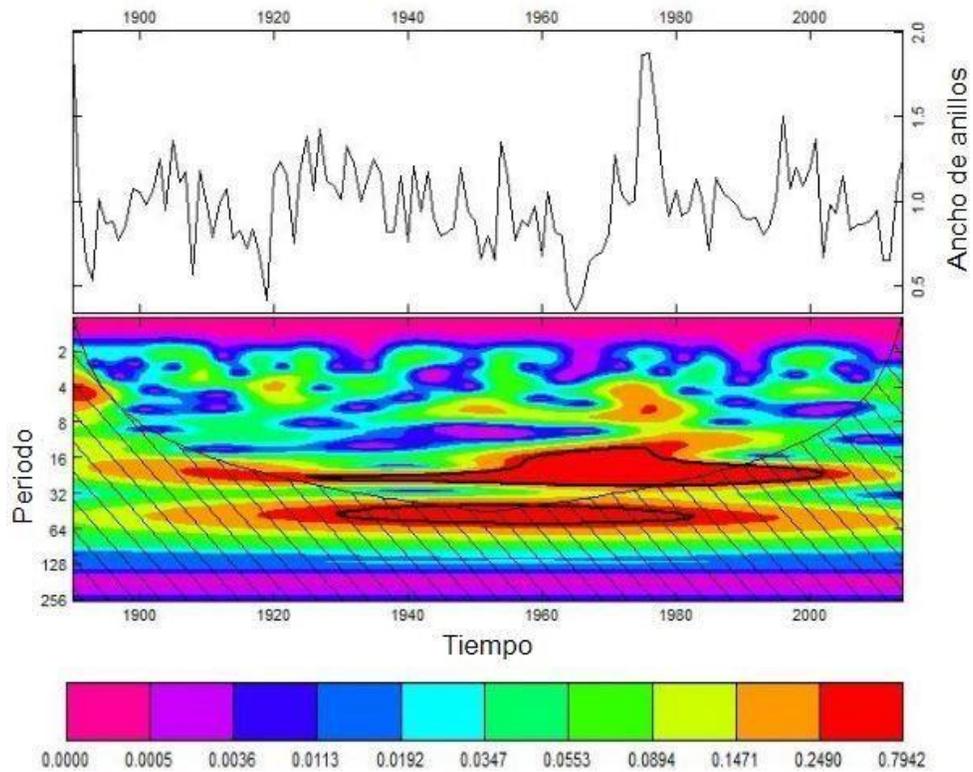
**Figura 13:** Espectro de frecuencia dominante de la cronología desde el año 1854 al 2014. En verde cronología muestras NP, límite de confianza (LC) naranja 99%, morado 95% y fucsia 90%.

Por otro lado, la figura 14, contiene el análisis espectral para la serie maestra obtenida tras haber realizado el corte de  $EPS > 0,85$  desde el año 1890 al 2014, en esta figura se visualiza una frecuencia dominante que sobrepasa el nivel de confianza del 90% (color fucsia) para un periodo de 4 años aproximadamente.

Y por último, a partir del análisis Wavelet de la cronología truncada (figura 15), se identificó que la señal espectral más fuerte (en colores cálidos) corresponde a un periodo que va de 4 a 8 años entre los años 1970 a 1980.



**Figura 14:** Espectro de frecuencia dominante de la cronología desde el año 1890 al 2014. En verde cronología muestras NP, límite de confianza (LC) naranja 99%, morado 95% y fucsia 90%.



**Figura 15:** Análisis Wavelet de la cronología del Nunatak (1890 a 2014).

### 3.2 COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS COMO TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN CON LA CRONOLOGÍA DE ANCHO DE ANILLOS DE *NOTHOFAGUS PUMILIO*.

Como se mencionó en páginas anteriores, en esta investigación se utilizaron las herramientas Routine RespoAverage y Routine RespoSum, por lo que, se realizaron los análisis a través de una ventana temporal de 41 meses, seleccionando el conjunto de datos en periodos móviles de 1 a 12 meses, comenzando en enero del segundo año calendario anterior (t-2) y terminando en mayo del año dendrocronológico actual para el hemisferio sur (t+1).

De acuerdo a la convención de Schulman (1956), en el hemisferio sur se le asigna a cada anillo el año calendario correspondiente al año de formación, que parte en primavera desde el mes de septiembre y se extiende hasta invierno del año siguiente. Bajo esa línea, debido a que las muestras fueron colectadas durante el año 2015, el último año que está formado corresponde al año 2014.

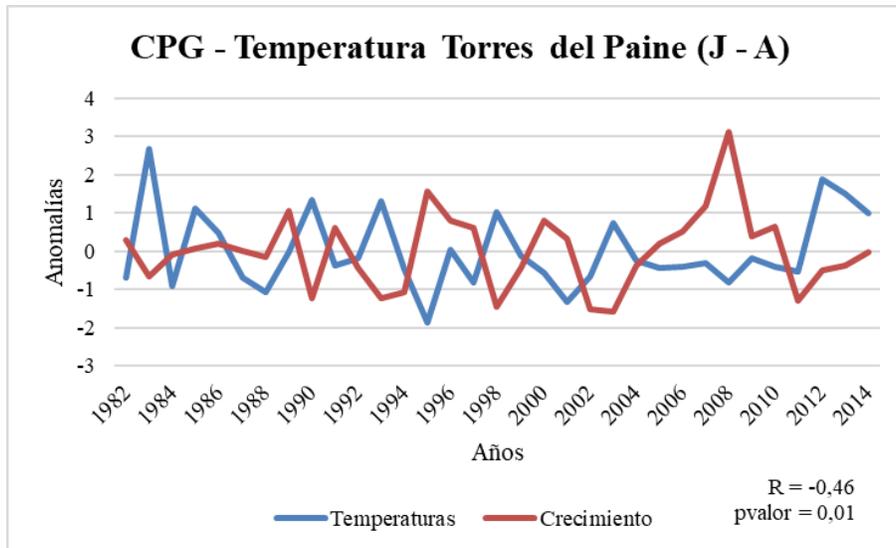
Por lo tanto, a partir del análisis de correlación de Pearson, entre las cronologías estándar de *Nothofagus pumilio* de los sitios de muestreo (morrena lateral – CPG y Nunatak - NP) del glaciar Grey, y las variables climáticas (anomalías de temperatura media y precipitación media mensual) de los datos grillados del glaciar Grey, y de las estaciones meteorológicas de Torres del Paine (TPD), Puerto Natales (PN) y Punta Arenas (PUQ), se presentan los siguientes resultados.

#### 3.2.1 Clima de Torres del Paine

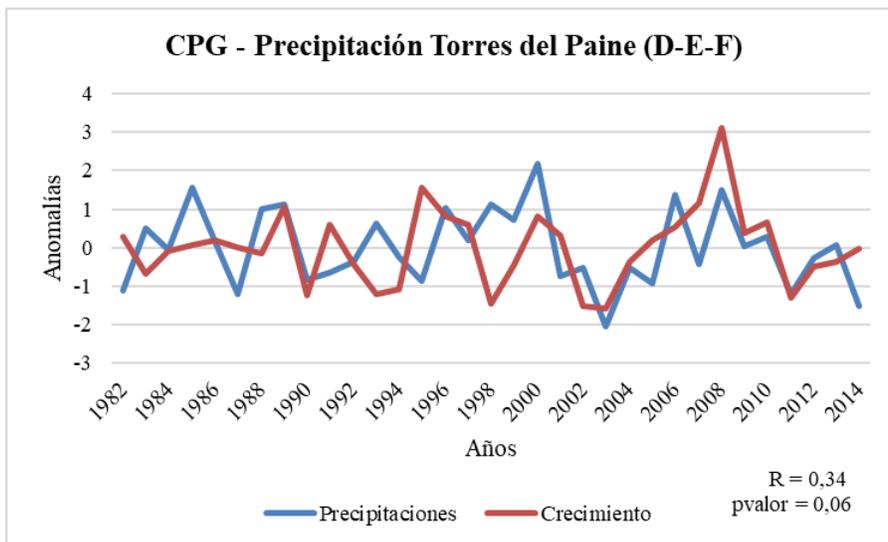
##### 3.2.1.1 CPG

Respecto a los datos meteorológicos de la estación de Torres del Paine (TDP) para el periodo común de 1982 - 2014, entre la cronología CPG y la temperatura media (figura 16), la mejor correlación encontrada fue de -0,46 para la combinación de meses de julio y agosto del año en curso (t), lo que indica que el sitio tiene una respuesta negativa ante las temperaturas de invierno previas al periodo de crecimiento.

Por otro lado, la precipitación afecta a la cronología de manera inversa, presentando una correlación positiva (0,34) entre los meses de diciembre, enero y febrero del periodo de crecimiento actual (t), por lo tanto, el sitio tiene una respuesta positiva ante las lluvias de verano del año de crecimiento (figura 17).



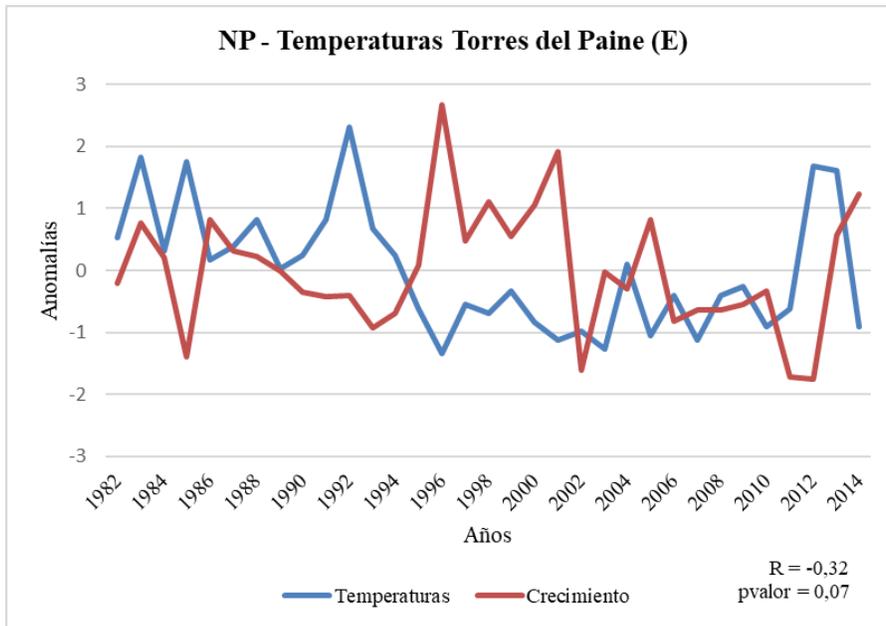
**Figura 16:** Relación entre anomalías de temperatura (TDP) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.



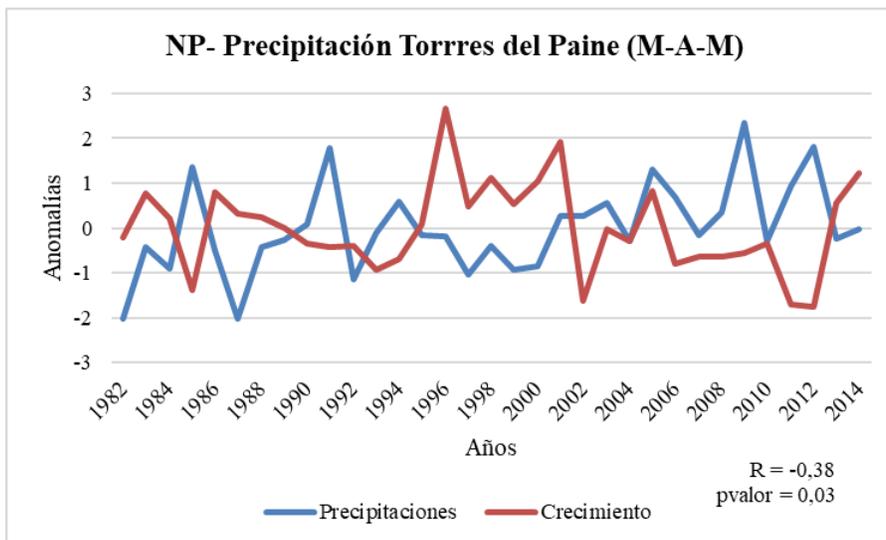
**Figura 17:** Relación entre anomalías de precipitación (TDP) y ancho de anillos cronología estándar CPG.

### 3.2.1.2 NP

Entre el patrón de crecimiento de la cronología NP y las variables climáticas de la estación TDP, para el periodo común de 1982 - 2014, se obtuvo una correlación de -0,32 con la temperatura para el mes de enero del año en curso (t) y una correlación de -0,38 con la precipitación para la combinación de meses de marzo, abril y mayo del año en curso (t).



**Figura 18:** Relación entre anomalías de temperatura (TDP) y ancho de anillos de cronología estándar NP.



**Figura 19:** Relación entre anomalías de precipitación (TDP) y ancho de anillos de cronología estándar NP

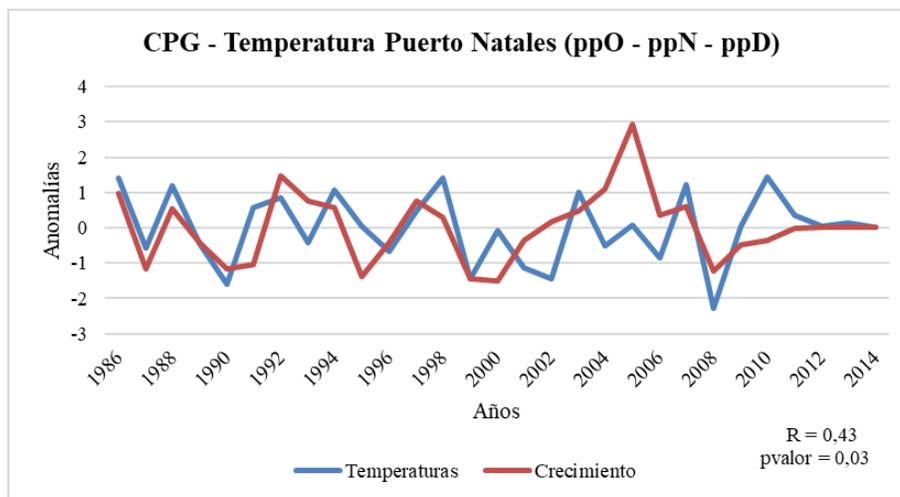
Bajo esa línea, tanto la temperatura como la precipitación se correlacionan negativamente con la cronología del Nunatak del glaciar Grey, de manera que el sitio responde negativamente ante las temperaturas de los meses de verano y ante las precipitaciones de los meses de otoño previos al periodo de crecimiento (figuras 18 y 19).

### 3.2.2 Clima de Puerto Natales

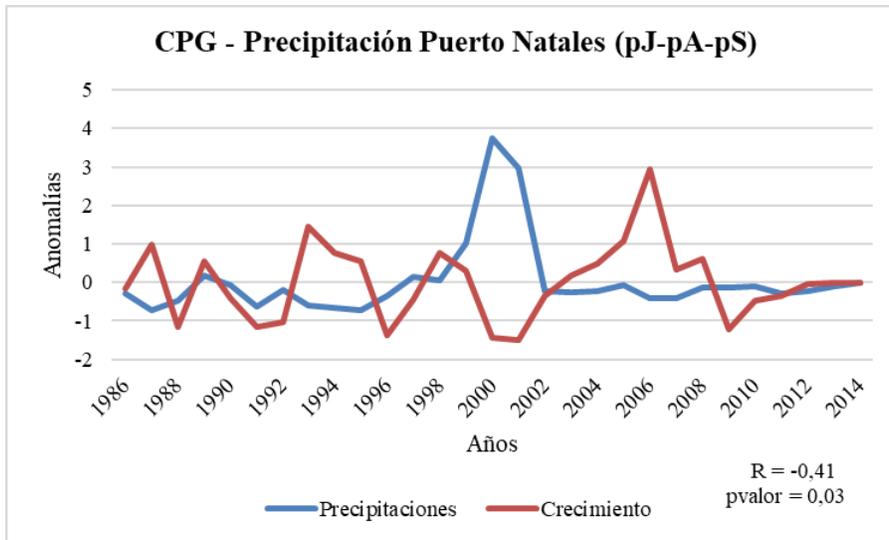
#### 3.2.2.1 CPG

En el caso de la cronología CPG y las variables climáticas de la estación meteorológica de Puerto Natales (PN), se analizó un periodo común entre 1986 – 2014. Respecto a la temperatura media, la mejor correlación encontrada fue en los meses de octubre, noviembre y diciembre de dos años de crecimiento previos (t-2) con una correlación de 0,43. Lo que indica que el sitio responde de manera positiva a las temperaturas de verano de dos años previos a la temporada de crecimiento de la especie (figura 20).

Situación contraria ocurre con las precipitaciones, puesto que la mejor correlación obtenida es negativa, con un valor de -0,41 para los meses de julio, agosto y septiembre de un año previo (t-1). Por ende, el sitio responde negativamente a las precipitaciones de los meses de invierno de dos años previos al periodo de crecimiento (figura 21).



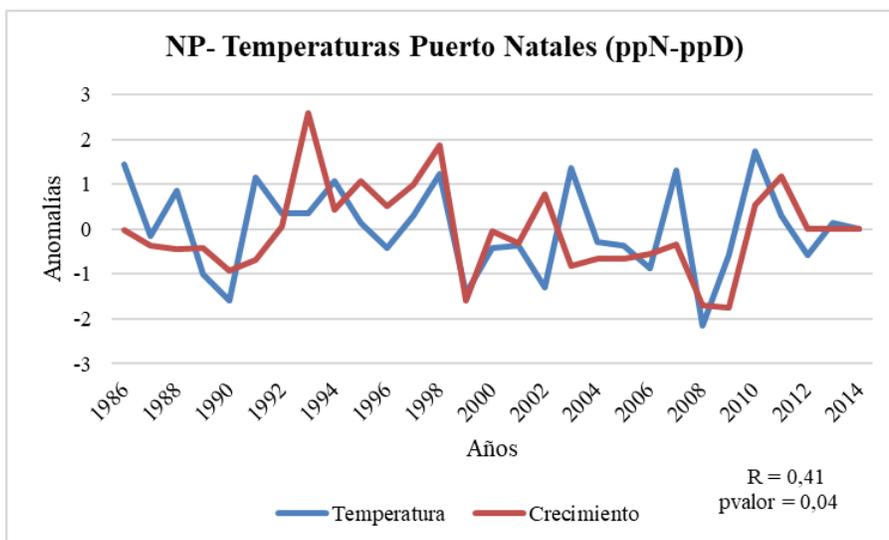
**Figura 20:** Relación entre anomalías de temperatura (PN) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.



**Figura 21:** Relación entre anomalías de precipitación (PN) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.

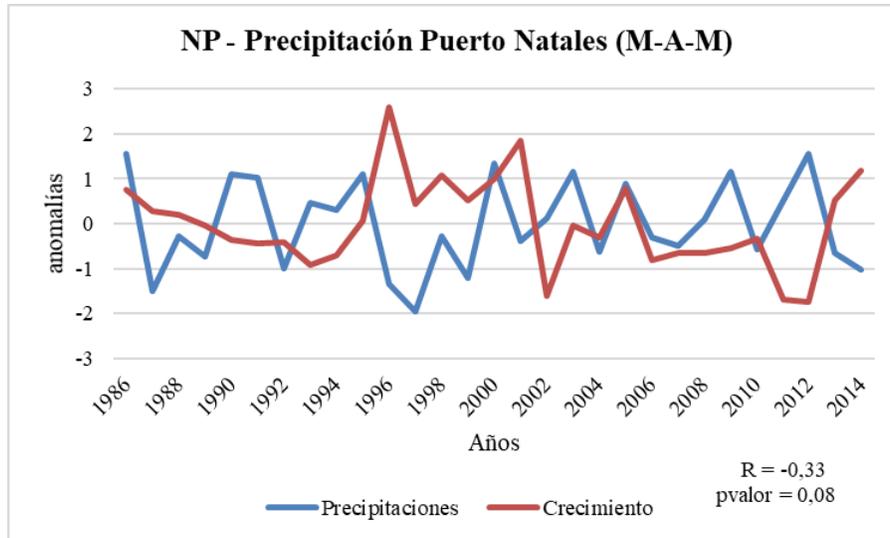
### 3.2.2.2 NP

Para el periodo en común de 1986 – 2014, entre la cronología de ancho de anillos NP y las variables climáticas de PN, se obtuvo una correlación de 0,41 con la temperatura en los meses de noviembre y diciembre de dos años de crecimiento previos (t-2). Mientras que respecto a la precipitación, se obtuvo una correlación negativa de -0,33 para los meses de marzo, abril y mayo del año de crecimiento actual (t).



**Figura 22:** Relación entre anomalías de temperatura (PN) y ancho de anillos de cronología estándar NP.

Por lo tanto, el sitio tiene una respuesta positiva con las temperaturas de primavera de dos años previos, y una respuesta negativa con las precipitaciones de otoño previas al periodo de crecimiento (figuras 22 y 23).



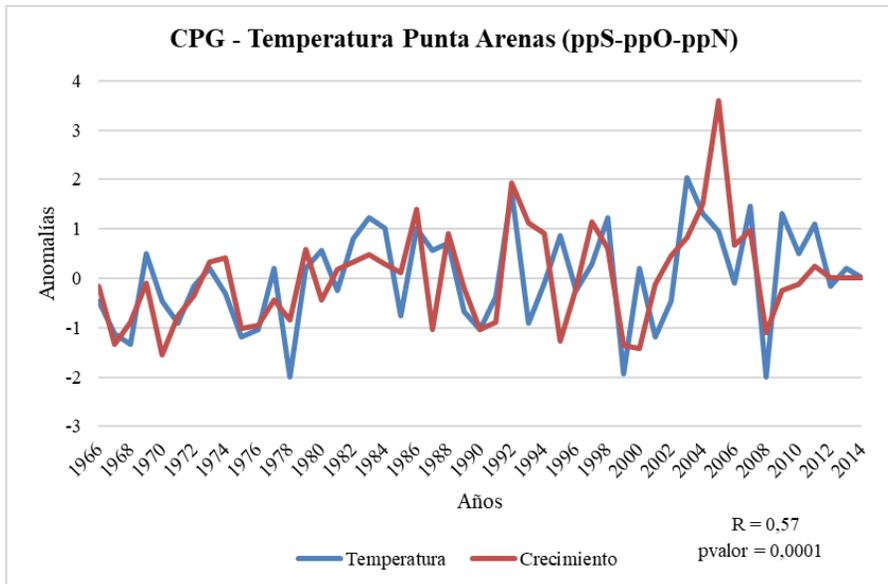
**Figura 23:** Relación entre anomalías de precipitación (PN) y ancho de anillos de cronología estándar NP.

### 3.2.3 Clima de Punta Arenas

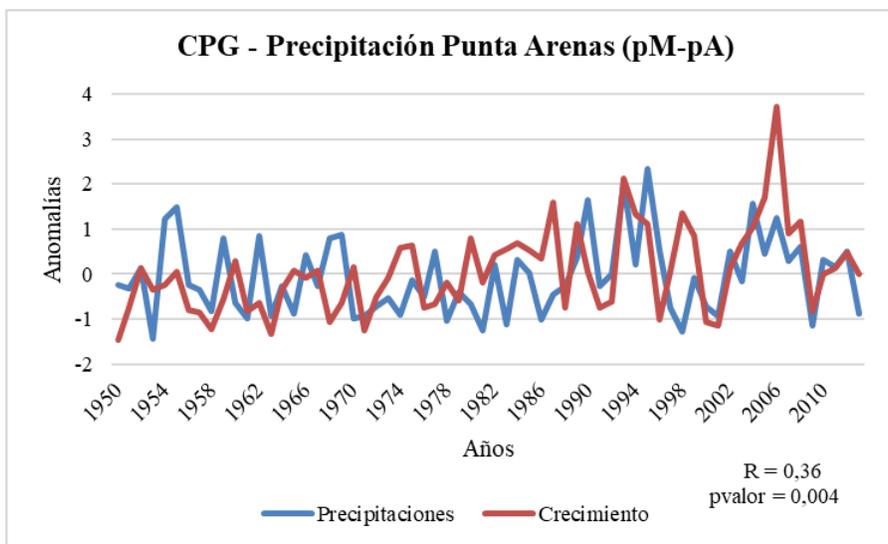
#### 3.2.3.1 CPG

Para identificar la relación entre las variables climáticas de la estación meteorológica de Punta Arenas (PUQ) y la cronología CPG, se analizó un periodo en común entre 1966 – 2014 para la temperatura, en donde la mejor correlación encontrada fue de 0,57 para los meses de septiembre, octubre y noviembre de dos años de crecimiento previos (t-2). Y para la precipitación, en un periodo entre 1950 al 2014, la mejor correlación obtenida fue de 0,36 para los meses de marzo y abril de un año previo (t-1).

De acuerdo a lo anterior, el sitio de muestreo tiene una respuesta positiva ante las temperaturas de primavera y las precipitaciones de otoño de dos años previos al período de crecimiento (figuras 24 y 25).



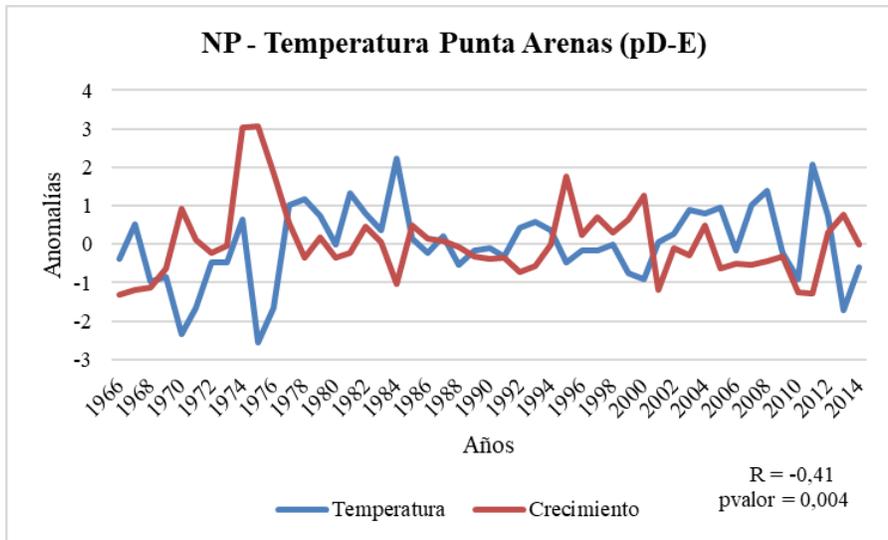
**Figura 24:** Relación entre anomalías de temperatura (PUQ) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.



**Figura 25:** Relación entre anomalías de precipitación (PUQ) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.

### 3.2.3.2 NP

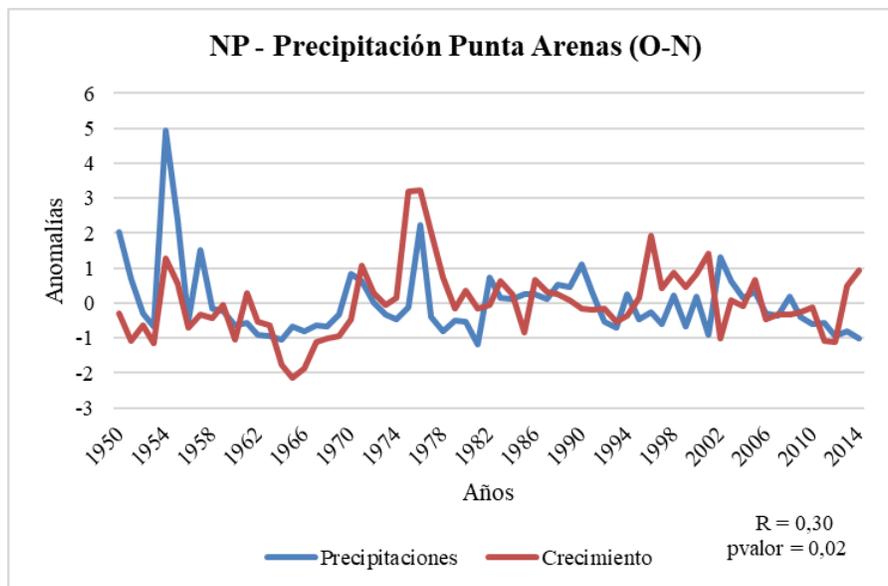
Situación diferente a la anterior, es el caso de la cronología NP y las variables climáticas de PUQ, puesto que para el periodo en común entre 1966 – 2014, en relación a la temperatura media la mejor correlación que se obtuvo fue de -0,41 para el mes de diciembre un año previo (t-1) y enero del año actual (t).



**Figura 26:** Relación entre anomalías de temperatura (PUQ) y ancho de anillos de cronología estándar NP.

Mientras que, para la precipitación, se obtuvo una correlación de 0,30 para los meses de octubre y noviembre del año actual (t) en un periodo entre 1950- 2014.

En este caso, el sitio responde de manera negativa ante las temperaturas del verano anterior al periodo de crecimiento, y positivamente ante las precipitaciones de primavera del periodo de crecimiento (figuras 26 y 27).



**Figura 27:** Relación entre anomalías de precipitación (PUQ) y ancho de anillos de cronología estándar NP.

### 3.2.4 Clima de glaciar Grey

#### 3.2.4.1 CPG

En cuanto a la relación entre las variables climáticas de los datos grillados del glaciar Grey y la cronología CPG, en un periodo en común entre 1920 – 2014. Se obtuvo una correlación de -0,21 con la temperatura media para los meses de julio y agosto (t). Y respecto a la precipitación, se obtuvo una correlación de 0,26 para los meses de febrero, marzo y abril de un año previo (t-1).

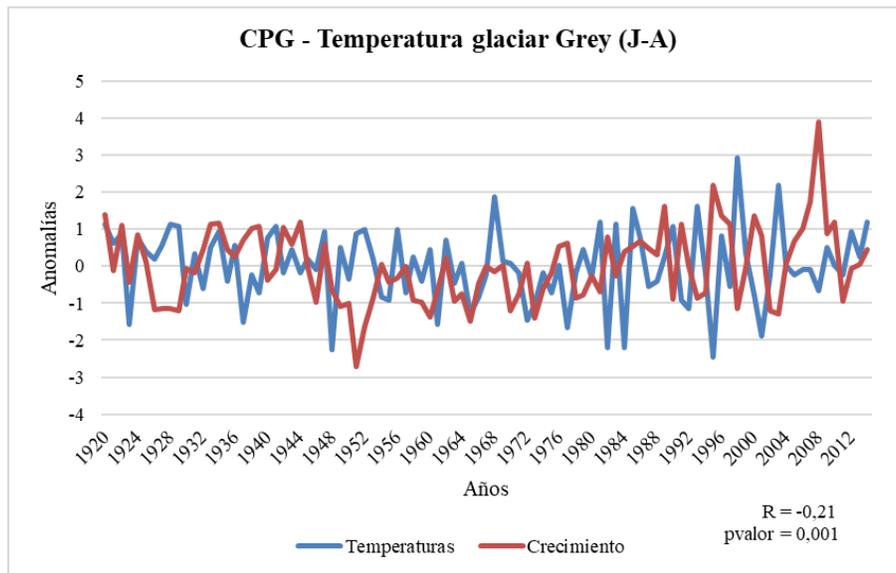


Figura 28: Relación entre anomalías de temperatura (GG) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.

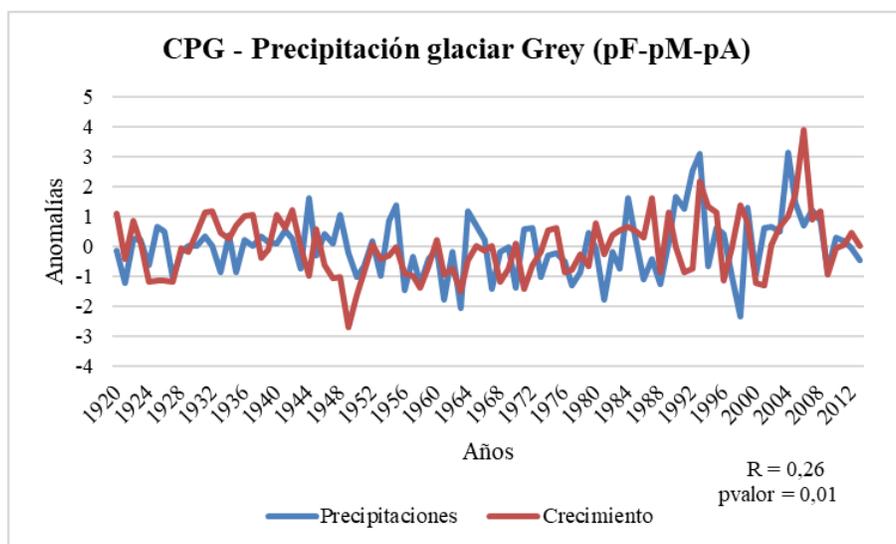
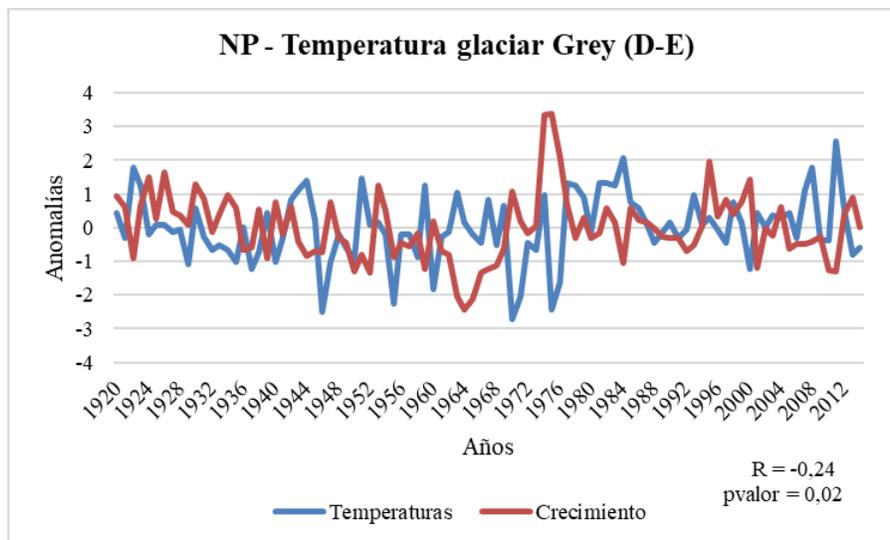


Figura 29: Relación entre anomalías de precipitación (GG) y ancho de anillos de cronología estándar CPG.

En otras palabras, la respuesta del sitio es negativa ante las temperaturas del invierno previo al periodo de crecimiento y positiva para las precipitaciones de los meses de verano/otoño de dos años previos al periodo de crecimiento (figuras 28 y 29).

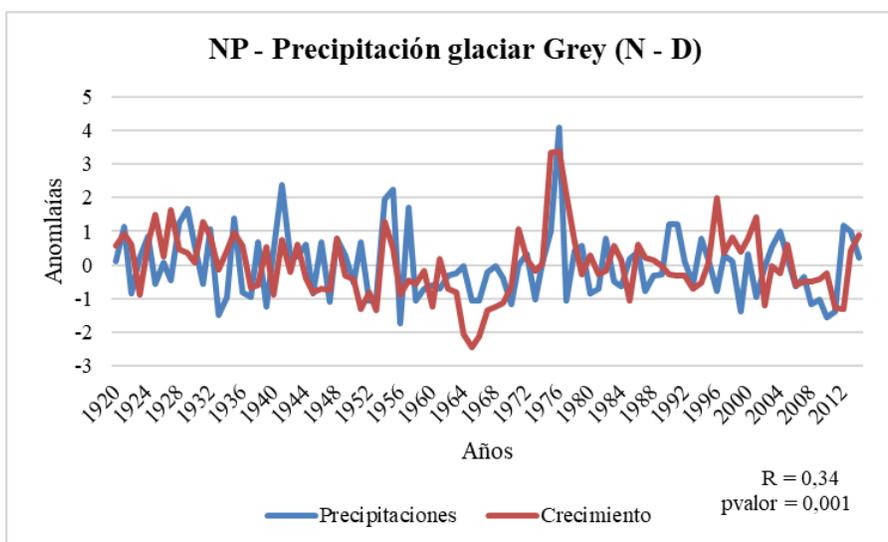
### 3.2.4.2 NP

En el caso de la cronología de ancho de anillos NP, con las variables climáticas del glaciar Grey, se obtuvo una correlación negativa de -0,24 con la temperatura media para los meses de diciembre (t-1) y enero del año actual (t). Mientras que con la precipitación se obtuvo una correlación de 0,34 para la combinación de meses de noviembre y diciembre del año actual (t). De esta manera, el sitio presenta una respuesta negativa ante las temperaturas del verano previo al periodo de crecimiento y positiva ante las precipitaciones de primavera durante el periodo de crecimiento (figuras 30 y 31).



**Figura 30:** Relación entre anomalías de temperatura (GG) y ancho de anillos de cronología estándar NP.

Finalmente, a modo de resumen, en la tabla 6, se encuentran todos los resultados obtenidos de la correlación entre las anomalías de temperatura y precipitación con las cronologías estándar de ancho de anillos de *Nothofagus pumilio* de cada sitio de muestreo.



**Figura 31:** Relación entre anomalías de precipitación (GG) y ancho de anillos de cronología estándar NP.

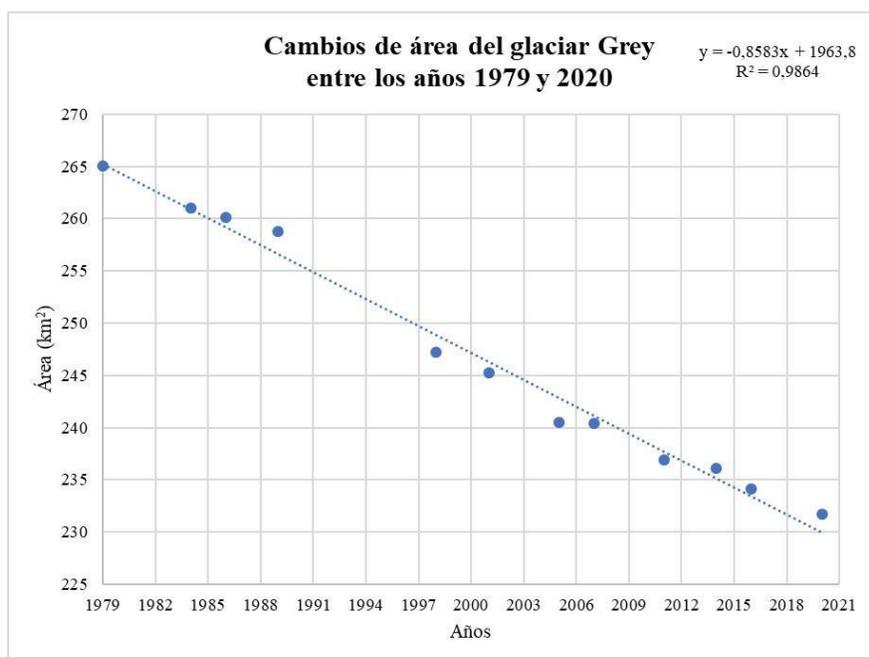
**Tabla 6:** Resumen resultados de correlación entre anomalías de las cronologías (CPG y NP) y las variables climáticas de precipitación y temperatura.

Estación Meteorológica / Datos grillados	Cronología de Ancho de Anillos	Variable Climática	Meses de Correlación	Coefficiente de Correlación
Torres del Paine	CPG	Temperatura	J-A (t)	-0,46
		Precipitación	D-E- F (t)	0,34
	NP	Temperatura	E (t)	-0,32
		Precipitación	M-A-M (t)	-0,38
Puerto Natales	CPG	Temperatura	O-N-D (t-2)	0,43
		Precipitación	J-A-S (t-1)	-0,41
	NP	Temperatura	N-D (t-2)	0,41
		Precipitación	M-A-M (t)	-0,33
Punta Arenas	CPG	Temperatura	S-O-N (t-2)	0,57
		Precipitación	M-A (t-1)	0,36
	NP	Temperatura	D (t-1) - E (t)	-0,41
		Precipitación	O-N (t)	0,30
Glaciar Grey	CPG	Temperatura	J - A (t)	-0,21
		Precipitación	F-M-A (t-1)	0,26
	NP	Temperatura	D (t-1) -E (t)	-0,24
		Precipitación	N-D (t)	0,34

### 3.3 VARIACIONES DEL GLACIAR GREY Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS.

#### 3.3.1 Digitalización y cálculo de áreas

A partir de las imágenes satelitales obtenidas para el periodo de años entre 1979 y 2020 (tabla 3), se realizó la digitalización manual del contorno de la cuenca glaciar Grey, y posteriormente se realizó el cálculo de área para cada año.



**Figura 32:** Cambios de área en km<sup>2</sup> del glaciar Grey entre los años 1979 y 2020

**Tabla 7:** Áreas en km<sup>2</sup> por año del glaciar Grey.

Años	Área (km2)
1979	265,05
1984	260,98
1986	260,11
1989	258,76
1998	247,23
2001	245,26
2005	240,46
2007	240,38
2011	236,87
2014	236,15
2016	234,14
2020	231,70

En general, se observó una clara tendencia a la disminución del área glaciar desde 1979 al año 2020 (figura 32), presentando una superficie estimada de 265,05 km<sup>2</sup> en 1979, 260,98 km<sup>2</sup> en 1984, 260,11 km<sup>2</sup> en 1986, 258,76 en 1989, 247,23 en 1998, 245,26 en 2001, 240,46 km<sup>2</sup> en 2005, 240,38 km<sup>2</sup> en 2007, 236,87 km<sup>2</sup> en 2011, 236,15 km<sup>2</sup> en 2014, 234,14 km<sup>2</sup> en 2016 y 231,70 km<sup>2</sup> en 2020 (tabla 7). De esta manera, el glaciar perdió 33,35 km<sup>2</sup> en 41 años (tasa de 0,81 km<sup>2</sup>/año).

Por lo tanto, de acuerdo al cálculo estimado de áreas y la delimitación del glaciar por año, queda en evidencia el antes y después del glaciar Grey, presentando grandes cambios en su extensión (figura 33), principalmente en su zona frontal (figura 34).

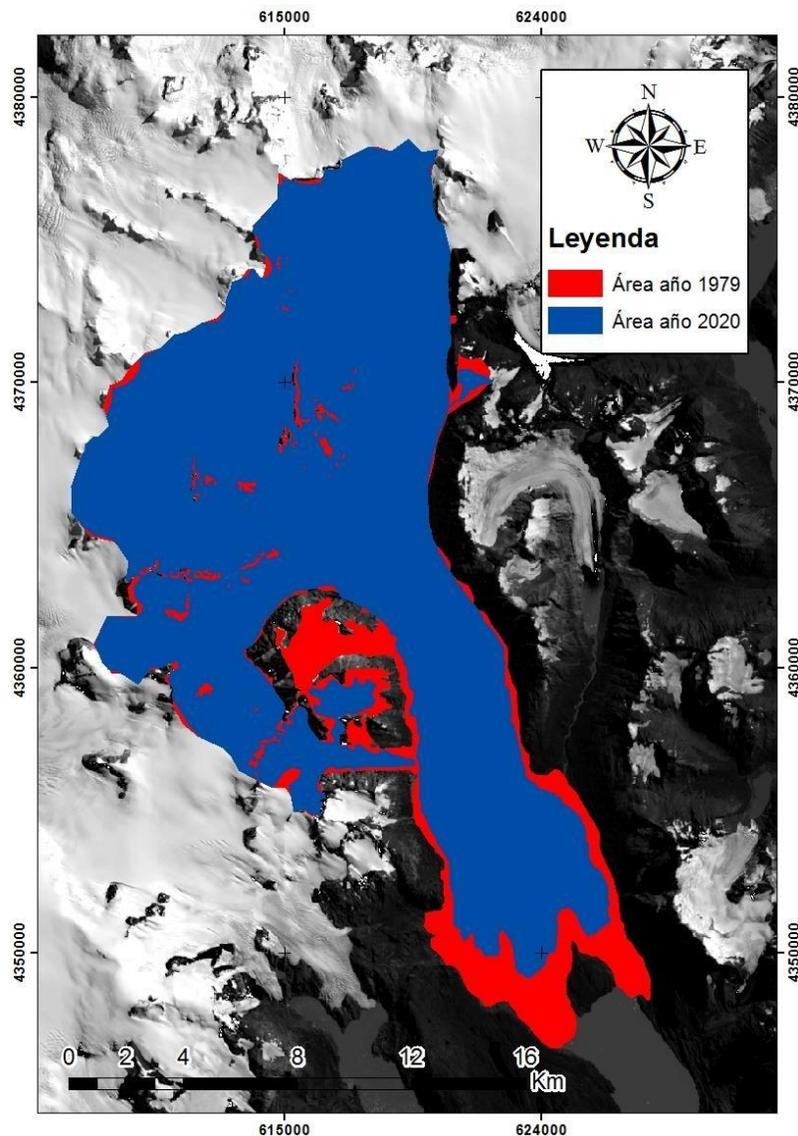


Figura 33: Variación área glaciar Grey desde 1979 (en rojo) al 2020 (azul).

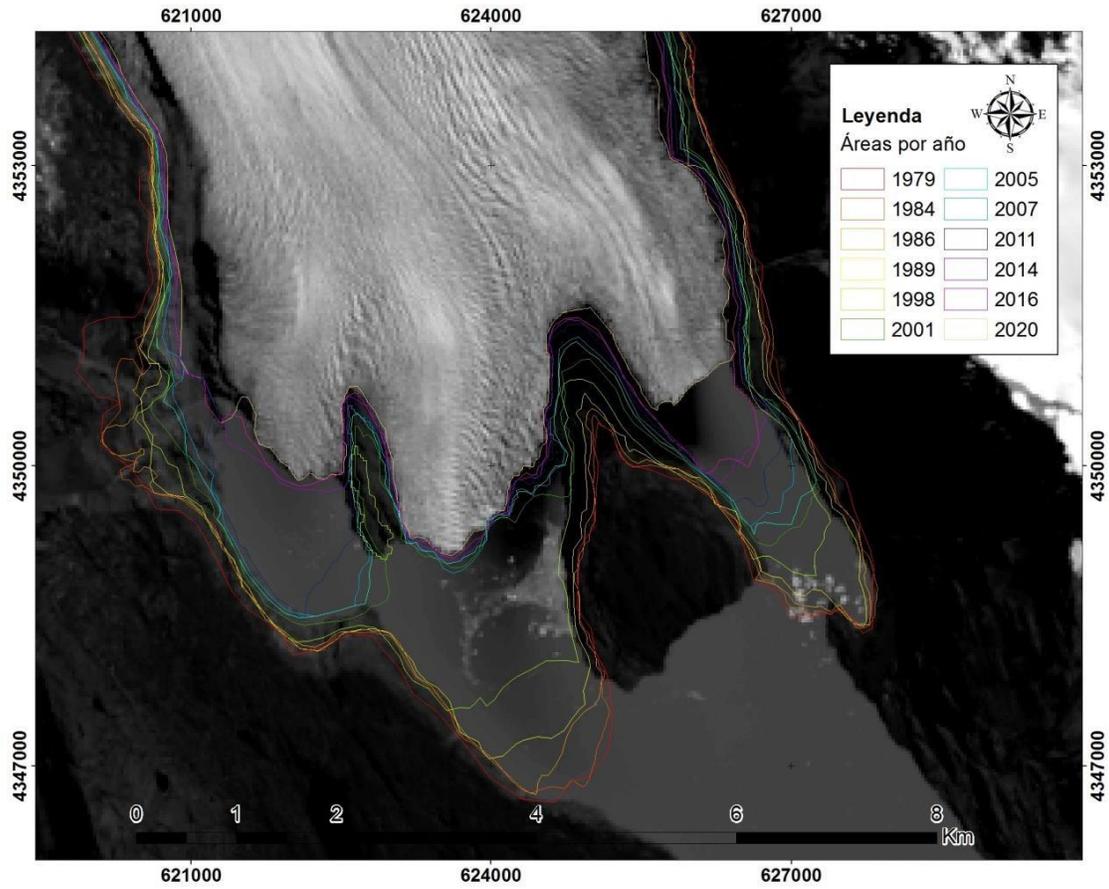


Figura 34: Variaciones frontales glaciér Grey entre 1979 al 2020.

### 3.3.2 Tasas de retroceso glaciér Grey

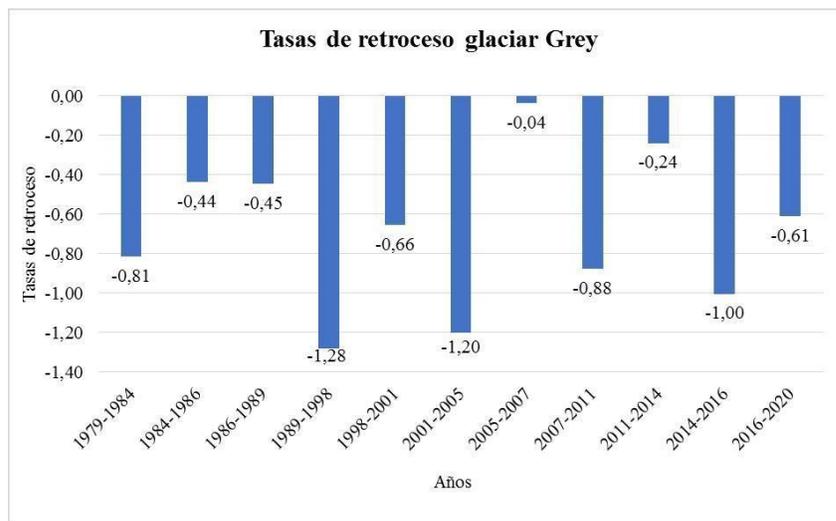


Figura 35: Tasas de retroceso glaciér Grey.

Luego de obtener las áreas del glaciar para cada año de estudio, se calculó la tasa de retroceso por periodo, obteniendo los resultados expuestos en la figura 35.

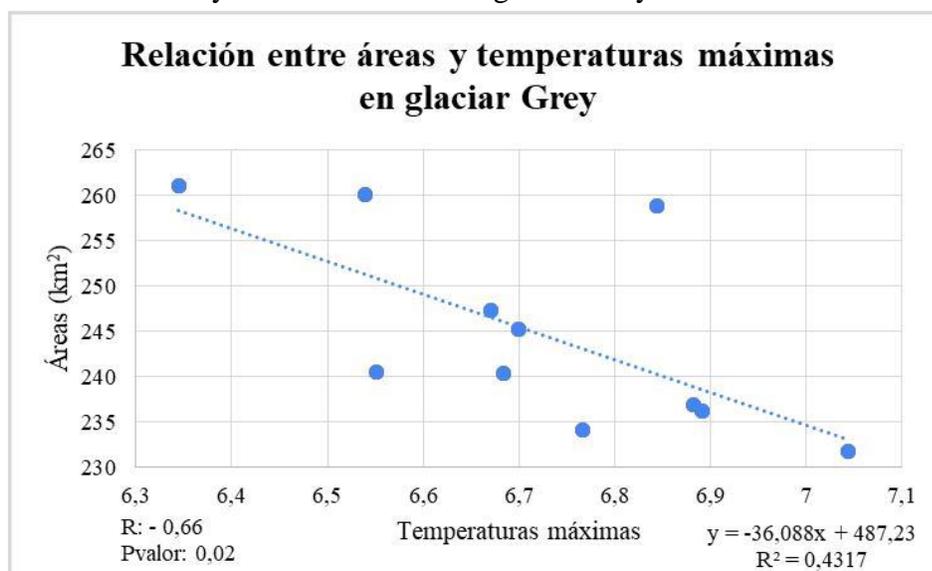
De acuerdo a los resultados obtenidos sobre las fluctuaciones del glaciar, durante el periodo de 1979 – 1984 se registró un retroceso de 0,81 km<sup>2</sup>/año, mientras que en los periodos de 1984 – 1986 y 1986 – 1989 el glaciar presentó un retroceso de 0,44 km<sup>2</sup>/año y 0,45 km<sup>2</sup>/año respectivamente. El periodo entre 1989 - 1998 presentó un retroceso de 1,28 km<sup>2</sup>/año, entre 1998 – 2001 de 0,66 km<sup>2</sup>/año, entre 2001 – 2005 de 1,20 km<sup>2</sup>/año, entre 2005 – 2007 de 0,04 km<sup>2</sup>/año, entre 2007 – 2011 de 0,88 km<sup>2</sup>/año, seguido de retrocesos de 0,24 km<sup>2</sup>/año, 1,00 km<sup>2</sup>/año y 0,61 km<sup>2</sup>/año, para los periodos de 2011 - 2014, 2014 - 2016 y 2016 - 2020, respectivamente.

### 3.3.3 Relación entre áreas del glaciar, tasas de retroceso y variables climáticas

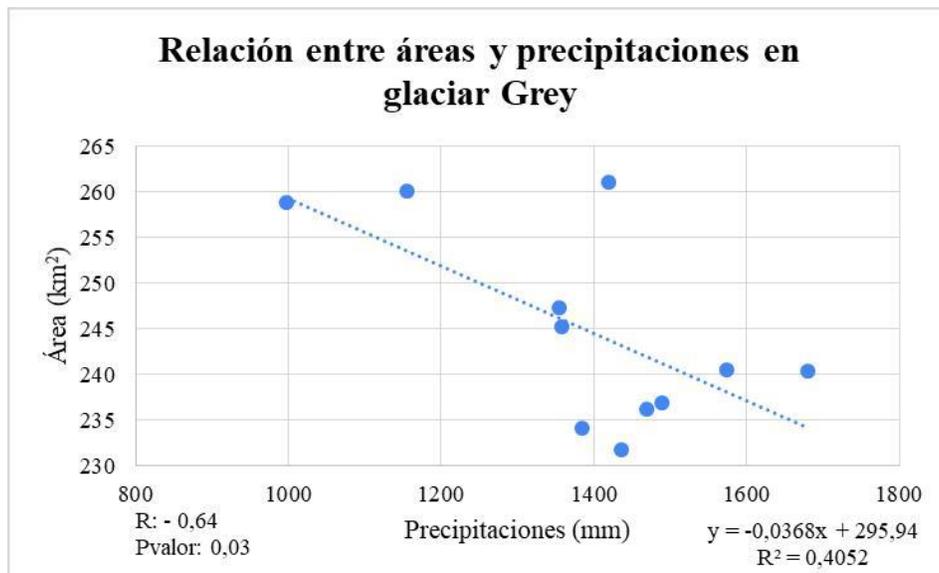
Como se mencionó en páginas anteriores, para identificar si existe o no una relación entre las variables climáticas con los cambios de área y/o tasas de retroceso del glaciar Grey, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson.

De esta manera, cabe mencionar que si bien se realizaron los cálculos de correlación con las variables climáticas de precipitación media mensual y temperatura media, máxima y mínima mensual, se obtuvo como resultado una mejor relación entre los cambios de área y tasas de retroceso del glaciar Grey con las temperaturas máximas y las precipitaciones.

#### 3.3.3.1 Variables climáticas y cambios de área del glaciar Grey



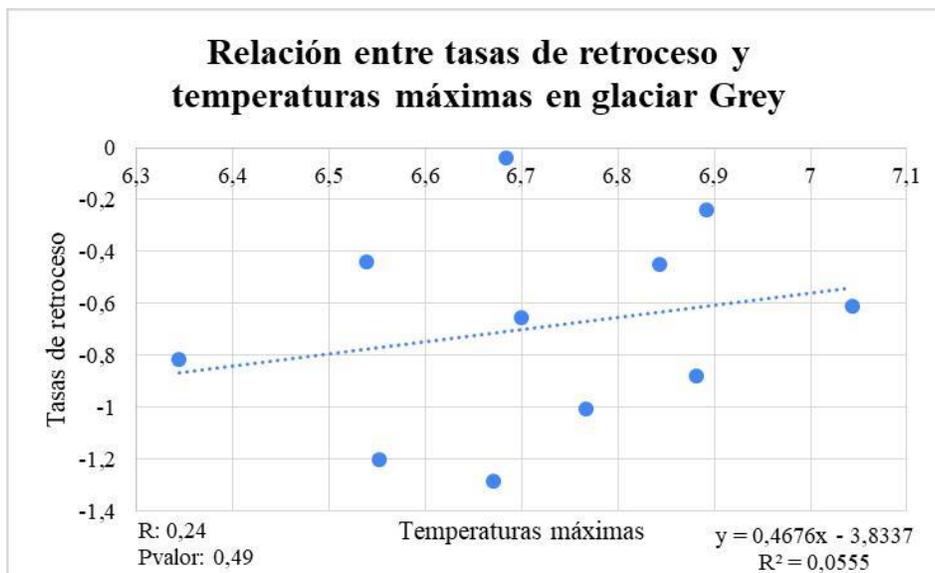
**Figura 36:** Relación entre temperaturas máximas (promedio por periodo) y áreas del glaciar Grey.



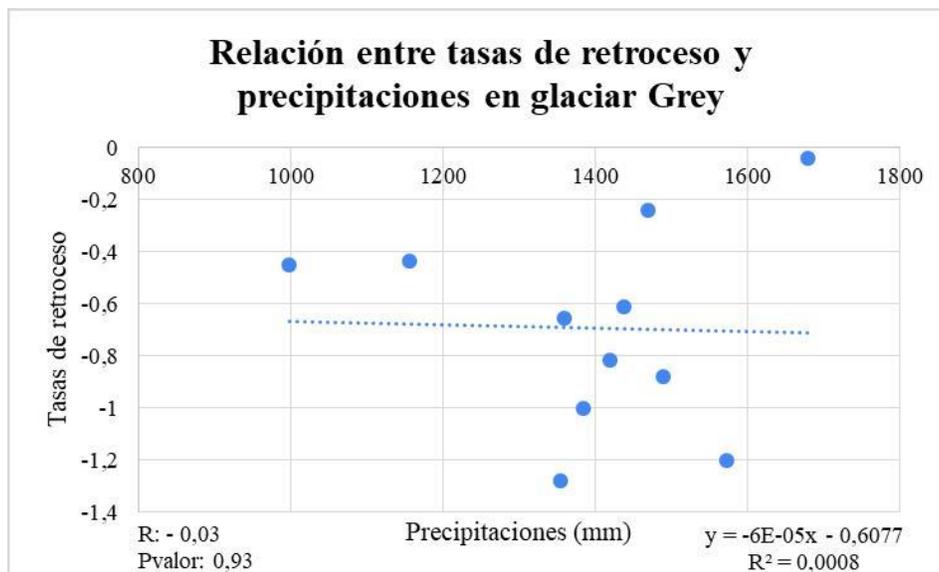
**Figura 37:** Relación entre precipitaciones (promedio por periodo) y áreas del glaciar Grey.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la correlación estadística de Pearson (R) entre las temperaturas máximas y las áreas del glaciar es de - 0,66 (figura 36), mientras que por otra parte, la correlación de la precipitación y la superficie glaciar es de -0,64 (figura 37). Estos valores permiten afirmar que existe un nivel de asociación entre el retroceso del glaciar Grey y la variabilidad de la temperatura y la precipitación, en este caso, la superficie glaciar (área) disminuye a medida que aumentan las temperaturas y aumentan las precipitaciones.

#### 3.3.3.2 Variables climáticas y tasas de retroceso



**Figura 38:** Relación entre temperaturas máximas (promedio por periodo) y tasas de retroceso del glaciar Grey.



**Figura 39:** Relación entre precipitaciones (promedio por periodo) y tasas de retroceso del glaciar Grey.

La correlación estadística de Pearson (R) entre las temperaturas máximas y las tasas de retroceso del glaciar Grey es de 0,24 (figura 38), mientras que la correlación de las precipitaciones y las tasas es de -0,03 (figura 39). Debido a que los valores obtenidos no presentan una correlación significativa, no se puede afirmar que exista algún nivel de asociación o relación entre las tasas de retroceso y las variables climáticas.

## CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

### 4.1 DISCUSIÓN

#### 4.1.1 Tendencias de crecimiento de las cronologías de *Nothofagus pumilio* en glaciar Grey.

En la presente investigación, se realizó un estudio dendroclimático con el objetivo de identificar cómo se comportan las especies de *Nothofagus pumilio* cercanas al área del glaciar Grey ante las variables climáticas de temperatura y precipitación. De acuerdo a esto, las cronologías fueron estandarizadas con 3 métodos (curva exponencial negativa, spline y mean), y se determinó la que mejor se ajustara o se correlacionara con las variables climáticas.

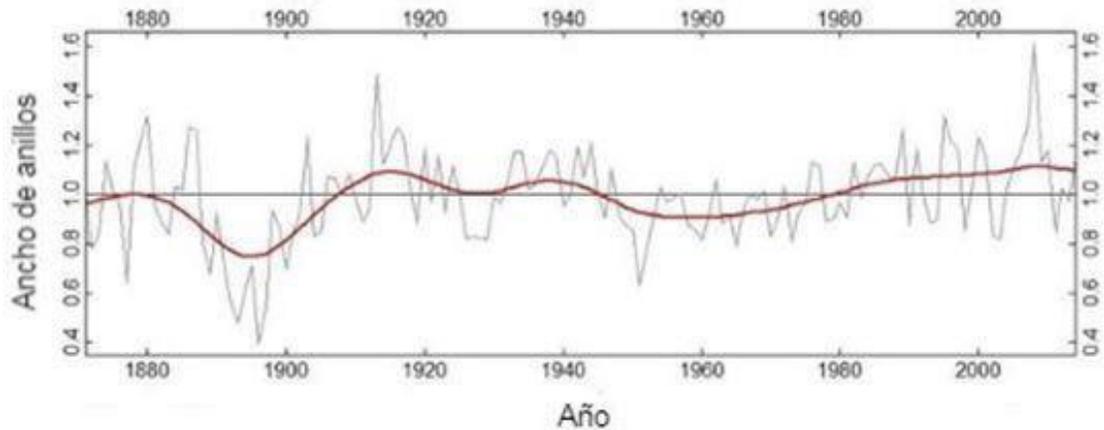
Bajo esa línea, se obtuvo como resultado una estandarización diferenciada para cada sitio de muestreo, por lo tanto, si bien estos dos bosques están muy cerca presentan un comportamiento diferente.

Para el primer sitio de muestreo correspondiente a la morrena lateral del glaciar (ver figura 3), la cronología CPG presentó un coeficiente de Pearson positivo de 0,597, lo que indica un alto grado de similitud entre las muestras provenientes del mismo sitio.

Además, debido a que en este lugar, los árboles presentaban características asociadas a mayor antigüedad, troncos más rectos, más altos y grandes, llegando a una altura aproximada de 15 a 20 mts, la estandarización utilizada fue la de curva exponencial negativa, puesto que esta estandarización refleja el comportamiento clásico de disminución del ancho de anillos debido al envejecimiento del árbol, cuando los factores de competencia y disturbios locales son mínimos (Aliste, 2016; Fritts, 1976).

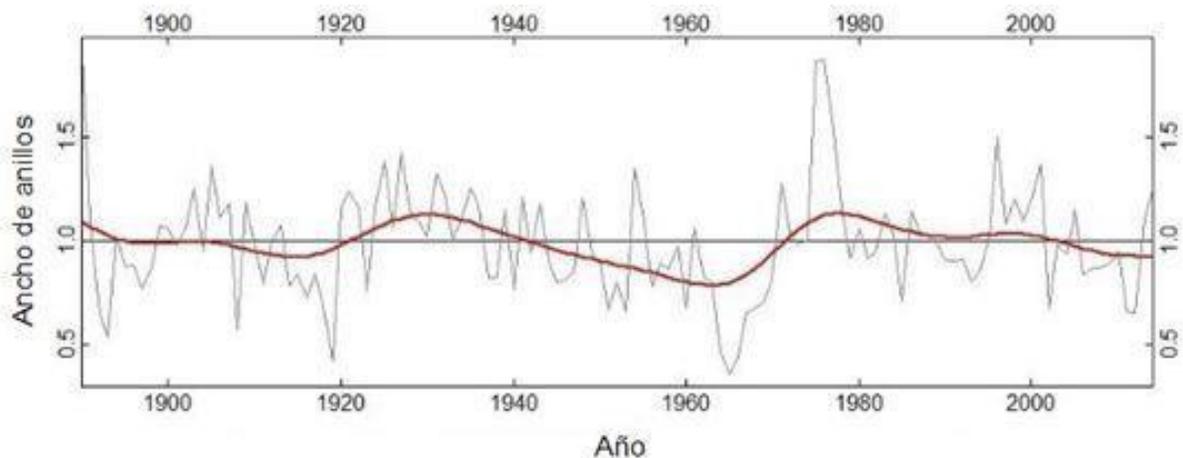
Si bien, esta cronología presentó un rango temporal de 307 años que va desde 1709 al 2014, de acuerdo a la señal expresada de la población (EPS), esta cronología posee una buena estabilidad temporal desde 1870 al 2014, por lo tanto, presenta un periodo confiable con fuerte señal de crecimiento común para los últimos 144 años.

Por lo tanto, considerando que la cronología estándar es confiable a partir del año 1870 se puede observar en la figura 40 que el ancho de anillos sigue una tendencia bajo la media entre los años 1890 a 1900, posteriormente se acerca a la media y desde el año 1960 en adelante comienza a visualizarse un incremento en el ancho de anillos hasta el año 2010 aproximadamente, con un leve decrecimiento hacia el final del año en estudio (2014).



**Figura 40:** Cronología estándar CPG filtrada. EPS > 0,85 para el periodo temporal desde 1870 al 2014.

Por otro lado, la cronología del segundo sitio (ver figura 3) correspondiente al Nunatak del glaciar Grey, presentó una correlación positiva de 0,705 de manera que existe una muy buena relación entre las muestras de este sitio. Sin embargo, a diferencia del primer sitio de muestreo, en este sitio, se encontraban árboles no muy altos, con una altura promedio desde 5 a 10 mts, con malas condiciones sanitarias, por lo que, se deduce que en este sitio el bosque se encontraba en condiciones estresantes por un posible contacto reciente con el glaciar. Bajo esa línea, la estandarización utilizada fue la curva flexible suavizada (Spline de 30 años), puesto que en el caso de este bosque era necesario ajustar las series de crecimiento de manera flexible para eliminar los cambios en el crecimiento radial de los arboles debidos a la dinámica forestal y al régimen de perturbaciones (Ribas, 2006).



**Figura 41:** Cronología estándar NP filtrada. EPS > 0,85 para el periodo temporal desde 1890 al 2014.

La cronología NP presentó un rango temporal de 161 años desde 1854 al 2014, pero de acuerdo a la EPS, la serie presenta una fuerte señal de crecimiento en común a partir del año 1890, por ende, la cronología es confiable desde dicho año, de manera que posee una buena estabilidad temporal para los últimos 124 años.

En la figura 41 se observa que en la cronología NP, el ancho de anillos presenta una tendencia bajo la media entre los años 1950 a 1970, que posteriormente se acerca a la media y aumenta hacia 1980, sin embargo, desde dicho año el ancho de anillos presenta un marcado acercamiento a la media mientras que desde el 2000 en adelante se visualiza una clara disminución en el ancho de anillos hasta el final del año en estudio (2014).

Por lo tanto, respecto a las tendencias de crecimiento de las cronologías de *Nothofagus pumilio* en glaciar Grey, se obtuvo que ambas cronologías presentan una tendencia a la disminución del ancho de sus anillos hacia el año 2014, y que en el caso de las muestras pertenecientes al Nunatak (NP) esta disminución es mucho más evidente que en las muestras de la morrena lateral (CPG).

Estos resultados coinciden con otros estudios sobre el comportamiento de especies de *Nothofagus pumilio*, tales como la investigación de Álvarez et al. (2015), que reveló que el crecimiento radial de lenga en el límite arbóreo del volcán Choshuenco ha disminuido desde 1990 al 2012. Misma tendencia identificó Castellano et al. (2017), donde se demostró una disminución del crecimiento radial de especies de *N. pumilio* ubicadas en el Lago del Desierto (Patagonia Argentina), a partir de la década de 2000.

Esta tendencia a la formación de anillos más delgados en las últimas décadas, también se respalda por la investigación de Ruiz (2020), debido a que en este estudio la cronología estándar que se obtuvo para especies ubicadas en el Monte Tenerife, presentó una brusca disminución en el crecimiento de sus anillos a partir de mediados de la década del noventa hasta el año 2017.

De este modo, se confirma que las especies *Nothofagus pumilio* han presentado una respuesta negativa al crecimiento desde el 2000 en adelante, en el caso de los sitios de muestreo de esta investigación, se deduce que en NP se evidencia mayormente este decrecimiento, puesto que este bosque se encuentra bajo factores derivados de un retroceso glaciar mucho más reciente, por ende, presenta condiciones de mayor estrés para el crecimiento de esta especie (lo que es totalmente visible en el aspecto de las muestras colectadas).

Por otro lado, en cuanto a los análisis de poder espectral de las series de anillos, para la cronología CPG en el periodo de tiempo que va desde el año 1709 al 2014, se obtuvo una frecuencia dominante que sobrepasa el límite de confianza del 95% y 99% para un periodo de 7 años. Sin embargo, al analizar el poder espectral de la cronología a partir de 1870, dada la confiabilidad de la señal expresada por la población (EPS), se visualizó una

frecuencia dominante por sobre el nivel de confianza del 90% y sobrepasando el nivel de confianza de 95% para un periodo de 4 años aproximadamente.

En el caso de la cronología NP, para el periodo de 1854 al 2014, se visualizó frecuencias dominantes que sobrepasan el límite de confianza del 90% y 95% para periodos que van de los 6 a 5 años y desde 4 a 3 años. No obstante, tras la realización del corte  $EPS > 0,85$ , para el periodo 1890 al 2014, se observó una frecuencia dominante que sobrepasa el nivel de confianza del 90% para un periodo estimado de 4 años.

Respecto al comportamiento cíclico de las cronologías, diversos autores han identificado que el crecimiento radial de los bosques de *Nothofagus pumilio* presenta un comportamiento cíclico cercano a 7 años, en sectores de Tierra del Fuego, Isla Navarino, Monte Tenerife y otros sectores de la Región de Magallanes (Aravena et al., 2002; Cuevas, 2002; Ruiz, 2020).

De acuerdo a los resultados obtenidos en ambas cronologías, solo la cronología CPG (sin corte EPS) presentó una frecuencia dominante para un periodo de 7 años, sin embargo, al considerar la señal expresada de la población, en el análisis wavelet se observó una señal cíclica en la cronología que va entre 4 y 6 años entre los años 1880 y 1890 y otro periodo por sobre la media, entre los años 1910 y 1940 aproximadamente. En la cronología NP, por otro lado, se observó frecuencias dominantes para periodos de 6 a 5 años y desde 4 a 3 años, pero al considerar EPS, el análisis wavelet demostró que la señal espectral más fuerte corresponde a un periodo que va de 4 a 8 años entre los años 1970 a 1980.

Por lo tanto, si bien se ha identificado un comportamiento cíclico de 7 años de reducción del crecimiento radial de *Nothofagus pumilio* en varios sectores de la zona austral de Chile, considerando los resultados obtenidos de las cronologías del glaciar Grey, este ciclo no se ve tan marcado en este sitio, puesto que si bien, la cronología CPG lo presenta inicialmente, tras el corte EPS, se obtuvo una señal cíclica que va entre 4 a 6 años, resultado similar para la cronología NP, en donde se obtuvo una señal espectral más fuerte en periodos que van desde 4 a 8 años.

Según Ruiz (2020) “este ciclo varía entre uno o dos años dependiendo de la ubicación geográfica de las muestras de bosques de *Nothofagus pumilio*” (p.41). Por lo que, cabe mencionar que si bien el patrón cíclico de 7 años no se cumple del todo en las cronologías obtenidas, si presenta la variación de uno a dos años. Bajo esa línea, para futuras investigaciones sería ideal obtener más cronologías del sitio de muestreo, de manera, de identificar si realmente este sitio presenta un comportamiento cíclico de 7 años de reducción de crecimiento radial como en varios sectores de Chile austral.

#### 4.1.2 Respuesta de anillos de crecimiento ante variables climáticas.

La especie *Nothofagus pumilio* ha sido una de las más utilizadas en estudios dendroclimatológicos puesto que esta especie posee un amplio rango latitudinal que va desde los 35° 35' S hasta los 55°31'S (Duarte, 2014). De esa manera, utilizando solo esta especie, se pueden generar reconstrucciones climáticas para una transecta de 2.200 km aproximadamente (Lara et al. 2001).

Bajo esa línea, la respuesta de los anillos de crecimiento de *Nothofagus pumilio* ante ciertas condiciones climáticas ha sido estudiada en distintas latitudes por diversos autores, demostrando que el crecimiento radial de esta especie se ve directamente influenciado por las variables de temperatura y/o precipitación, así como también, de las condiciones del sitio que esta habite (Álvarez, 2015; Aravena et al. 2002; Lara et al. 2001; Lara et al. 2005; Masiokas y Villalba, 2004; Ruiz, 2020; Watson y Luckman, 2004).

En la presente investigación se analizó las cronologías de ancho de anillos para dos sitios de muestreo (morrena lateral y Nunatak) y su relación con el clima, a través del uso de funciones de correlación entre las cronologías estándar y las anomalías mensuales de temperatura y precipitación de los datos grillados del glaciar Grey y las estaciones de Torres del Paine, Puerto Natales y Punta Arenas.

##### 4.1.2.1 CPG

De acuerdo a los resultados obtenidos (ver tabla 6), la cronología CPG presenta una correlación de 0,57 con las temperaturas de Punta Arenas (septiembre- octubre- noviembre) y de 0,43 para Puerto Natales (octubre-noviembre-diciembre). Mientras que para Torres del Paine y los datos grillados del glaciar Grey presenta una correlación negativa de -0,46 y de -0,21 respectivamente (julio-agosto).

Bajo esa línea, el bosque de *Nothofagus pumilio* ubicado en la morrena lateral presentó una respuesta positiva ante las temperaturas de primavera de dos años previos al periodo de crecimiento y una respuesta negativa con las temperaturas del invierno previo al periodo de crecimiento.

En cuanto a las precipitaciones, la cronología CPG presentó una correlación de 0,34 con las precipitaciones de Torres del Paine (diciembre-enero-febrero), de 0,36 con Punta Arenas (marzo-abril) y de 0,26 para los datos grillados del glaciar (febrero-marzo-abril). Mientras que para Puerto Natales presentó una correlación negativa de -0,41 (julio-agosto-septiembre).

Ante esto, se obtuvo que el bosque de la morrena lateral reacciona de manera negativa ante las precipitaciones de invierno de dos años previos al periodo de crecimiento y positivamente antes las lluvias del verano previo al periodo de crecimiento, y las de otoño de dos años previos al periodo de crecimiento.

Las precipitaciones suelen variar mucho más que la temperatura, por lo tanto, la variabilidad en las respuestas encontradas se debe a las distintas ubicaciones de los datos climáticos utilizados.

#### 4.1.2.2 NP

En cuanto al efecto de la temperatura en el bosque de *Nothofagus pumilio* ubicado en el Nunatak del glaciar (tabla 6), se obtuvo como resultado una correlación positiva de 0,41 con la estación de Puerto Natales (noviembre-diciembre) y correlaciones negativas de -0,32 con la estación de Torres del Paine (enero), -0,41 con Punta Arenas (diciembre-enero) y de -0,24 con los datos grillados del glaciar (diciembre-enero).

Por ende, la cronología NP, responde positivamente ante las temperaturas de primavera de dos años previos al periodo de crecimiento, y negativamente ante las temperaturas de los meses de verano previos al periodo de crecimiento.

Respecto a la relación de la cronología del Nunatak con la variable de precipitación, se obtuvo una correlación positiva de 0,30 con Punta Arenas (octubre-noviembre) y de 0,34 con los datos grillados del glaciar (noviembre-diciembre), por otro lado, para las precipitaciones medidas por las estaciones de Torres del Paine y Puerto Natales, se obtuvo un correlación negativa de -0,38 y -0,33 respectivamente, para los meses de marzo, abril y mayo.

De esta manera, el sitio responde negativamente ante las precipitaciones del otoño previo al periodo de crecimiento y de manera positiva ante la lluvia de los meses de primavera del periodo de crecimiento.

Al comparar los resultados de ambos sitios de muestreo, se identificó que tanto en la morrena lateral como en el Nunatak, el crecimiento radial de *Nothofagus pumilio* se ve influenciado positivamente por las temperaturas de primavera de dos años previos al periodo de crecimiento (meses de septiembre a diciembre), y que además, en el caso del sitio CPG se identificó una respuesta negativa ante las temperaturas del invierno previo al periodo de crecimiento, y NP por otro lado, presento una respuesta negativa ante las temperaturas de verano previas al periodo de crecimiento.

Tal como se mencionó en páginas anteriores, la respuesta de los anillos de crecimiento de *Nothofagus pumilio* ante ciertas condiciones climáticas ha sido estudiada en por diversos autores. Lara et al. (2005), en su estudio latitudinal de crecimiento arbóreo de *N. pumilio* entre los 35° y los 55°S, plantea que si bien, en el extremo norte de la distribución de esta especie (35°) se encuentran correlaciones negativas con la temperatura, a medida que aumenta la latitud, dicha correlación se transforma en positiva.

Álvarez et al. (2015), en su estudio de crecimiento radial de lenga en el volcán Choshuenco (39°S), identificó una correlación positiva con la temperatura en los meses de noviembre a enero. Resultado similar obtuvo Ruiz (2020), quien realizó un estudio del crecimiento arbóreo de *Nothofagus pumilio* ubicados en el límite arbóreo del Monte Tenerife (51°), identificando una relación positiva con las temperaturas de primaveras de dos años previos y negativa con las de invierno previas al periodo de crecimiento.

Por lo tanto, respecto al efecto de la temperatura en el crecimiento radial de *N. pumilio*, los resultados obtenidos en los sitios de muestreo cercanos al glaciar Grey coinciden con los identificados por otras investigaciones, demostrando que la temperatura afecta posteriormente al crecimiento de árboles en sectores australes (Aravena et al., 2002). De esta manera, queda en evidencia que el crecimiento de un anillo responde a procesos de influencia climática que puede involucrar años previos (Fritts, 1976).

En cuanto a la relación del crecimiento de *Nothofagus pumilio* con la variable climática de precipitación, los resultados obtenidos presentan valores menos significativos que con la variable de temperatura, y además, ambos sitios presentan mayores diferencias entre sí. CPG, presenta una respuesta negativa ante las precipitaciones de invierno de dos años previos al periodo de crecimiento y reacciona de manera positiva ante las precipitaciones de otoño de dos años previos al crecimiento y a las de verano previas al periodo de crecimiento. NP, por otro lado, presenta una respuesta negativa ante las lluvias del otoño previo al periodo de crecimiento y positiva ante las lluvias de primavera del periodo de crecimiento.

Investigaciones como la de Masiokas y Villalba (2004) identificaron que la relación entre el crecimiento de lengas y las variables climáticas regionales para la zona sur de los Andes patagónicos, específicamente en el valle de Ameghino (50°S), presenta una correlación positiva con las precipitaciones de primavera (octubre a diciembre). Por otro lado, Álvarez et al. (2015), reveló una correlación negativa con las precipitaciones de primavera (noviembre y diciembre), resultados similares obtuvo Ruiz (2020), identificando que las precipitaciones de primavera y principios de verano de dos años previos se correlacionaban negativamente con el crecimiento de *Nothofagus pumilio*,

Si bien la cronología NP coincide con Masiokas y Villalba (2004), respecto a la correlación positiva con las precipitaciones de primavera. Al considerar la respuesta de las cronologías CPG y NP, estas no coinciden con los estudios mencionados.

Según Schlatter (1994), si se considera la distribución geográfica que posee la especie *Nothofagus pumilio*, la cantidad de precipitación anual no es un valor preciso de referencia para caracterizar los sitios de lenga, debido a la escasez de estaciones meteorológicas. Bajo esa línea, el autor plantea que una mejor referencia es el balance hídrico o la capacidad de retención de agua y de drenaje del suelo.

De acuerdo a Srur et al. (2008), la reducción del crecimiento radial de anillos de *N. pumilio*, “es consistente con la presencia de veranos más cálidos y precipitaciones cada vez más escasas, lo que incrementaría el déficit hídrico y por consiguiente la escases de agua disponible para el crecimiento” (p.251).

Por lo tanto, si bien el crecimiento radial se ve influenciado por las variables de temperatura y precipitación, surge la necesidad de contar con datos meteorológicos más cercanos a la zona de estudio, de manera de poder identificar las condiciones locales del sitio o quizás también, para investigaciones futuras, coleccionar un mayor número de muestras para reforzar las relaciones clima-crecimiento encontradas en los sitios de muestreo del glaciar Grey.

#### 4.1.3 Retroceso glaciar Grey en relación al clima

En cuanto a las variaciones del área de cobertura del glaciar Grey, se observó una tendencia a la disminución entre 1979 y 2020, con un área inicial estimada de 265,05 km<sup>2</sup> y de 231,70 km<sup>2</sup> para el último año de estudio, de esta manera, el glaciar perdió 33,35 km<sup>2</sup> en 41 años (tasa de 0,81 km<sup>2</sup>/año).

Los resultados expuestos en la presente investigación sobre el área de cobertura del glaciar Grey, resultaron ser muy similares a los obtenidos por otras investigaciones (Rivera y Casassa 2004; Saez, 2018; Weidemann et al., 2018; White & Copland, 2015). Y también, diversos autores coinciden en mencionar que el glaciar Grey es uno de los glaciares en los cuales se ha observado una pérdida de masa considerable que se ha ido agravando en las últimas décadas.

Como se mencionó en páginas anteriores, al realizar los cálculos de correlación de Pearson entre las áreas de cobertura del glaciar con las variables climáticas, se identificó que las correlaciones más significativas eran entre las áreas y las temperaturas máximas con las precipitaciones (-0,66 y -0,64 respectivamente). Por otro lado, al relacionar las tasas de retroceso con las variables climáticas, los valores extraídos no presentaron una correlación estadísticamente significativa, puesto que entre las temperaturas máximas y las tasas de

retroceso se obtuvo una correlación de 0,24 y con las precipitaciones de -0,03.

De esta manera, la presente investigación reveló que la disminución en el área del glaciar Grey durante el periodo 1979 al 2020 si presenta un nivel de asociación con los aumentos de temperaturas y el aumento de las precipitaciones (ver figuras 36 y 37).

A modo general, los glaciares se caracterizan por presentar una zona de acumulación y otra de ablación, en la primera se mantiene una ganancia de masa debido a la acumulación de nieve, mientras que en la última predomina la pérdida o fusión del hielo (Rivera et al., 2009). Según Borquez et al. (2006) la disminución de las precipitaciones genera una menor acumulación de nieve (Bórquez et al., 2006). De acuerdo a los resultados obtenidos de la relación entre el área de cobertura del glaciar y las precipitaciones, estos demuestran que en la zona del glaciar han aumentado las precipitaciones, sin embargo, como el área de este sigue disminuyendo, se deduce que el glaciar Grey no está recibiendo una alimentación suficiente de nieve para mantener un equilibrio, así como también se destaca la influencia e importancia de los eventos de desprendimientos (calving) que hacen que este glaciar presente una tendencia al retroceso.

Por otro lado, debido a que los valores obtenidos al relacionar las tasas de retroceso con las variables climáticas no presentaron una correlación significativa, se puede afirmar que las tasas de retroceso no se explican ni se asocian directamente con las variables climáticas, debido a que estas a diferencia de las áreas de cobertura por año, no presentan una disminución sostenida puesto que están sujetas a otros factores o variables ambientales que podrían explicar la dinámica de la superficie glaciar además del clima (Colonia y Torres, 2012).

Según Villalba (2019) ante el actual escenario climático, las respuestas de los cuerpos de hielo involucran una compleja interacción entre cambios de temperatura, radiación solar, precipitación, entre otras, que influyen en el balance de masa y energía de los glaciares, llevando consigo el retroceso de los frentes de hielo.

De acuerdo a Sugiyama et al. (2019), a modo general, los glaciares que culminan en el océano o en lagos, retroceden más rápido que los glaciares terrestres debido a que se encuentran más propensos a la pérdida de grandes porciones de hielo por eventos de calving. Aplicando esta información al caso del glaciar Grey, que también desemboca en agua dulce en el lago del mismo nombre, cabe mencionar que producto de la batimetría, la temperatura del agua y la fuerza de flotación, se genera torsión y tensión en el hielo, provocando fracturas en la base del glaciar, lo que da lugar a la formación ascendente de grietas basales y posteriormente a la propagación de icebergs (Sugiyama et al., 2019; Weidemann et al., 2018).

En ese sentido, estos eventos de desprendimientos (que en las últimas décadas han presentado un aumento) serían un fenómeno que podría explicar la variación en las tasas de retroceso durante los años en estudio entre 1979 al 2020. Por lo tanto, ante el actual

escenario climático, se confirma que el glaciar Grey, al igual que otros glaciares de Campos de Hielo Norte y Sur, presenta un claro retroceso en las últimas décadas influenciado por variables climáticas, ambientales y factores geográficos locales.

## 4.2 CONCLUSIONES

A través del análisis de relación entre clima, crecimiento arbóreo y las fluctuaciones del glaciar, la presente investigación, consistió en profundizar el conocimiento sobre los cambios en el área de cobertura del glaciar Grey ante el actual escenario climático.

En un esfuerzo por aumentar los registros dendrocronológicos en la Patagonia Austral de Chile, se generaron las primeras cronologías de *Nothofagus pumilio* pertenecientes a la zona del glaciar Grey (51°). De esta manera, se logró identificar los patrones de crecimiento radial de esta especie para dos sitios de muestreo (morrena lateral y Nunatak).

Como se mencionó previamente en esta investigación, el crecimiento de anillos de los árboles se ve directamente influenciado por las variables climáticas de temperatura y precipitación. De acuerdo a los resultados obtenidos al comparar las cronologías de ambos sitios con las variables climáticas, se identificó que tanto en la morrena lateral como en el Nunatak, la tendencia a la disminución del crecimiento radial de *Nothofagus pumilio* se relaciona directamente con el efecto que ejercen las temperaturas de verano e invierno previas al periodo de crecimiento y al efecto de las precipitaciones de invierno de dos años previos al periodo de crecimiento y de otoño previo al periodo de crecimiento, de esta manera, los resultados demuestran una respuesta al clima fuertemente influenciada por los factores locales de los sitios.

Por otro lado, respecto a la relación entre las variables climáticas, el área de cobertura y las tasas de retroceso del glaciar Grey, se identificó que el aumento de temperaturas máximas y el aumento de precipitaciones afectan en el retroceso glaciar. Y si bien, no se obtuvo correlaciones significativas entre las tasas de retroceso del glaciar y las variables climáticas, se deduce que al no presentar una disminución sostenida (como el área) estas están sujetas a otros factores o variables ambientales que podrían explicar la dinámica de la superficie glaciar además del clima, tales como el aumento de eventos de calving.

Bajo esa línea, la presente investigación confirma que las temperaturas y las precipitaciones en el área de estudio, afectan negativamente en el crecimiento de anillos de *Nothofagus pumilio* y favorecen la contracción de cobertura glaciar. Por lo tanto, la hipótesis planteada se rechaza parcialmente, puesto que la relación entre el crecimiento de anillos y las variaciones del glaciar se relacionan de manera directa, con tendencias a la disminución.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Abdel Jaber, W., Rott, H., Floricioiu, D., Wuite, J., & Miranda, N. (2019). Heterogeneous spatial and temporal pattern of surface elevation change and mass balance of the Patagonian ice fields between 2000 and 2016. *The Cryosphere*, 13(9), 2511–2535. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2511-2019>
- Aliste, D. (2016). Desarrollo de una cronología de ancho de anillos para *Fitzroya cupressoides* ((Molina) Johnston) y su relación con la variabilidad climática, en la Cordillera de la Costa, sector Los Pabilos, Región de Los Lagos, Chile. [Tesis de Pregrado]. Universidad Austral, Valdivia, Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2016/fifa414d/doc/fifa414d.pdf>
- Álvarez, C., Veblen, T., Christie, D., and González-Reyes, L. (2015). Relationships between climate variability and radial growth of *Nothofagus pumilio* near altitudinal treeline in the Andes of northern Patagonia, Chile. *Forest Ecology and Management*, 342, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.01.018>
- Aravena, J. C., Lara, A., Wolodarsky-Franke, A., Villalba, R., and Cuq, E. (2002). Treering 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. <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2002000200008>
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75pt2), 166–180. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147548>
- Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R. & Urquidi, J. (2006). Glaciares chilenos: reservas estratégicas de agua dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/29426>
- Bravo, N. (2017). Teledetección espacial Landsat, Sentinel2, Aster 11t y Modis. [https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion\\_espacial\\_ArcGeek.pdf](https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf)
- Bringas, C. (2019). *Uso de Herramientas Dendroquímicas para estimar cambios en contaminantes atmosféricos durante las últimas décadas en Coyhaique*. [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Bunn, A. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26 (2), 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

Castellano, P. (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*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

Clapperton, C. (2000). Interhemispheric synchronicity of Marine Oxygen Isotope Stage 2 glacier fluctuations along the American cordilleras transect. *Journal of Quaternary Science*, 15(4), 435–468.

ClimatologyLab. (2021). *TerraClimate*. Recuperado 30 de octubre de 2021, de <https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>

Colonia, D. & Torres, J. (2012). *Determinación del retroceso glaciar en la microcuenca de Llanganuco, a través del análisis multitemporal en el periodo 1987- 2007*. <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2012/05.14.18.05/doc/165.pdf>

CR2. (2021). *Explorador climático*. <http://explorador.cr2.cl/>

Cuevas, J. (2002). Episodic regeneration at the *Nothofagus pumilio* alpine timberline in Tierra del Fuego, Chile. *Journal of Ecology*, 90(1), 52–60. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00636.x>

Donoso, C. (2006). *Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: Autoecología* (1.<sup>a</sup> ed.). Marisa Cuneo. Valdivia, Chile. pp. 486-500

Duarte, G. (2014). *Patrones de crecimiento multicentenarios de Nothofagus pumilio a través de su rango de distribución altitudinal en los Andes Valdivianos*. [Tesis de pregrado]. Universidad Austral, Valdivia, Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/fifd812p/doc/fifd812p.pdf>

Fuentealba, M., Bahamóndez, C., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., & Latorre, C. (2021). The 2010–2020 «megadrought» drives reduction in lake surface area in the Andes of central Chile (32° - 36°S). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100952. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100952>

Fundación de Glaciares Chilenos. (2019). *Nuevo desprendimiento en glaciar Grey*. <https://www.glaciareschilenos.org/noticias/nuevo-desprendimiento-en-glaciar-grey/>

Foresta, L., Gourmelen, N., Weissgerber, F., Nienow, P., Williams, J., Shepherd, A., Drinkwater, M., & Plummer, S. (2018). Heterogeneous and rapid ice loss over the Patagonian Ice Fields revealed by CryoSat-2 swath radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 211, 441–455. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.041>

- Fritts, H. C. (1976). *Tree-ring and climate*. London, England: Academic Press.
- Google Earth Pro. (2020). *Glaciar Grey*. [https://www.google.com/intl/es-419\\_ALL/earth/versions/#download-pro](https://www.google.com/intl/es-419_ALL/earth/versions/#download-pro)
- González, H., Bozkurt, D., Cereceda-Balic, F., Cordero, R., Fernandoy, F., Iriarte, J., Macdonell, S., McPhee, J., Poulin, E., Rivera, A., Rojas, M. & Schaefer, M. (2019). *Criósfera chilena y Antártica: Recomendaciones desde la evidencia científica*. Comité científico COP25. <https://www.minciencia.gob.cl/comitecientifico/documentos/mesa-criosfera-y-antartica/13.Criosfera-Gonzalez.pdf>
- González, M. (2014). *Fluctuaciones de la altitud de la línea de equilibrio del glaciar Río Tranquilo (47.53°S, 72.40°O) entre la reversión fría antártica y el presente*. [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.
- González, M., Donoso, C., Ovalle, P. & Martínez-Pastur, G. (2006). *Nothofagus pumilio* (Poep. et Endl) Krasser. Lengua, roble blanco, leñar, roble de Tierra del Fuego. Familia: Fagaceae. En Donoso C (Ed.) *Las Especies Arbóreas de los Bosques Templados de Chile y Argentina, Autoecología*. Marisa Cuneo. Valdivia, Chile. pp. 486-500.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)
- Gutiérrez, E. (2009). *La dendrocronología: métodos y aplicaciones*. [https://www.researchgate.net/publication/228769173\\_La\\_dendrocronologia\\_metodos\\_y\\_aplicaciones](https://www.researchgate.net/publication/228769173_La_dendrocronologia_metodos_y_aplicaciones)
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 43, 69-75.
- Kaplan, M., Moreno, P. & Rojas, M. (2008). Glacial dynamics in southernmost South America during Marine Isotope Stage 5e to the Younger Dryas chron: a brief review with a focus on cosmogenic nuclide measurements. *Journal of Quaternary Science*, 23(6-7), 649-658. [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/118992/KAPLAN\\_MICHAEL.pdf?sequence=1](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/118992/KAPLAN_MICHAEL.pdf?sequence=1)
- Lara, A., Aravena, J. C., Villalba, R., Wolodarsky-Franke, A., Luckman, B., & Wilson, R. (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. <https://doi.org/10.1139/x00-208>

Lara, A., Villalba, R., Wolodarsky-Franke, A., Aravena, J. C., Luckman, B. H., & Cuq, E. (2005). Spatial and temporal variation in *Nothofagus pumilio* growth at tree line along its latitudinal range (35°40'-55° S) in the Chilean Andes. *Journal of Biogeography*, 32(5), 879–893. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01191.x>

Llancabure, J. (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 Pregrado]. Universidad Austral, Valdivia, Chile.

Llorente, C. (2012). La historia que nos explican los árboles. *Revista de divulgació de la Facultat de Biologia Universitat de Barcelona*. [https://revistes.ub.edu/index.php/b\\_on/issue/view/553](https://revistes.ub.edu/index.php/b_on/issue/view/553)

López, P., Chevallier, P., Favier, V., Pouyaud, B., Ordenes, F., & Oerlemans, J. (2010). A regional view of fluctuations in glacier length in southern South America. *Global and Planetary Change*, 71(1–2), 85–108. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.12.009>

Maidana, G. (2014). Aportes de las glaciaciones a la historia geológica de la tierra y la evolución y distribución de las especies. *Contribuciones Científicas GAEA*, 26, 155-167. <http://gaea.org.ar/contribuciones/Contribuciones2014/Maidana.pdf>

Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussailant, I., & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>

Masiokas, M., Rivera, A., Espizua, L., Villalba, R., Delgado, S. & Aravena, J. (2009). Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281: 242-268. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/153302>

Masiokas, M., & Villalba, R. (2004). Climatic significance of intra-annual bands in the wood of *Nothofagus pumilio* in southern Patagonia. *Trees*, 18(6), 696–704. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0355-6>

Perilla, G. A., & Mas, J. F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones Geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>

Ribas, M. (2006). *Dendroecología de Pinus halepensis Mill. en Este de la Península Ibérica e Islas Baleares: Sensibilidad y grado de adaptación a las condiciones climáticas*. [Tesis Doctoral]. Universidad de Barcelona, España.

Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C. y Vuille, M. (2016). Balance de masa glaciar. Ediciones CECs, Valdivia, Chile.

- Rivera, A., Bravo, C., & Buob, G. (2017). Climate Change and Land Ice. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, 1–15. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0538>
- Rivera, A., Brown, F., Carrión, D., Caro, D., Gimeno, F., Farías, D. & Cisternas, S. (2011). *Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas*. <https://snia.mop.gob.cl/sad/GLA5360.pdf>
- Rivera, A. & Cassasa, G. (2004). Ice Elevation, Areal, and Frontal Changes of Glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonia Icefield. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36 (4), 379–389. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0379:IEAAFC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0379:IEAAFC]2.0.CO;2)
- Rivera, A., Koppes, M., Bravo, C., & Aravena, J. C. (2012). Little Ice Age advance and retreat of Glaciar Jorge Montt, Chilean Patagonia. *Climate of the Past*, 8(2), 403–414. <https://doi.org/10.5194/cp-8-403-2012>
- Ruiz, P. (2020). *Relaciones entre clima, anillos de árboles y dinámica glaciar en el Monte Tenerife, Provincia de Última Esperanza*. [Tesis de magíster]. Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile.
- Sáez, N. (2018). *Estimación de los efectos del cambio climático en la extensión y volumen de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson, en el periodo 1998 – 2017*. [Tesis de pregrado]. Universidad de Concepción, Los Ángeles, Chile.
- Schlatter, J. E. (1994). Requerimientos de sitio para la lenga, *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser. *Bosque*, 15(2), 3–10. <https://doi.org/10.4206/bosque.1994.v15n2-01>
- Schulman, E. (1956). *Dendroclimatic change in semiarid America*. University of Arizona Press: University of Arizona Press.
- Solomina, O. N., Bradley, R. S., Jomelli, V., Geirsdottir, A., Kaufman, D. S., Koch, J., McKay, N. P., Masiokas, M., Miller, G., Nesje, A., Nicolussi, K., Owen, L. A., Putnam, A. E., Wanner, H., Wiles, G., & Yang, B. (2016). Glacier fluctuations during the past 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, 149, 61–90. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.04.008>
- Srur, A. M., Villalba, R., Villagra, P. E., & Hertel, D. (2008). Influencias de las variaciones en el clima y en la concentración de CO<sub>2</sub> sobre el crecimiento de *Nothofagus pumilio* en la Patagonia. *Revista chilena de historia natural*, 81(2). <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2008000200007>
- Sugiyama, S., Minowa, M. & Schaefer, M. (2019). Underwater ice terrace observed at the front of Glaciar Grey, a freshwater calving glacier in Patagonia. *Geophysical Research Letters*, 46, 2602–2609. <https://doi.org/10.1029/2018GL081441>

Stokes, M., and Smiley, T. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. The University of Chicago Press.

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78.

Urrutia, R. (2002). *Desarrollo de una cronología de anchos de anillos para alerce (Fitzroya cupressoides) y reconstrucción de la historia de incendios en el área de Abtao, Parque Nacional Chiloé, X Región*. [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.

Users, J. (2013). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales, *An Real Acad Med Cir Vall*, 50, 71-98. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4817473>

Vera, D. (2016). *Patrones de distribución espacial y representatividad de las especies arbóreas presentes en los territorios de Chile y Argentina*. [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Villalba, R. (2019). *Glaciares y cambio climático*. [https://www.researchgate.net/publication/336217578\\_Glaciares\\_y\\_Cambio\\_Climatico](https://www.researchgate.net/publication/336217578_Glaciares_y_Cambio_Climatico)

Viñas, J. (2012). *El clima de la Tierra a lo largo de la historia*. <http://www.divulgameteo.es/uploads/Clima-Tierra-historia-JMV.pdf>

VoorTech. (2020). *MeasureJ2X Information and Requirements*. <http://www.voortech.com/projectj2x/docs/measureJ2XInfo.html>

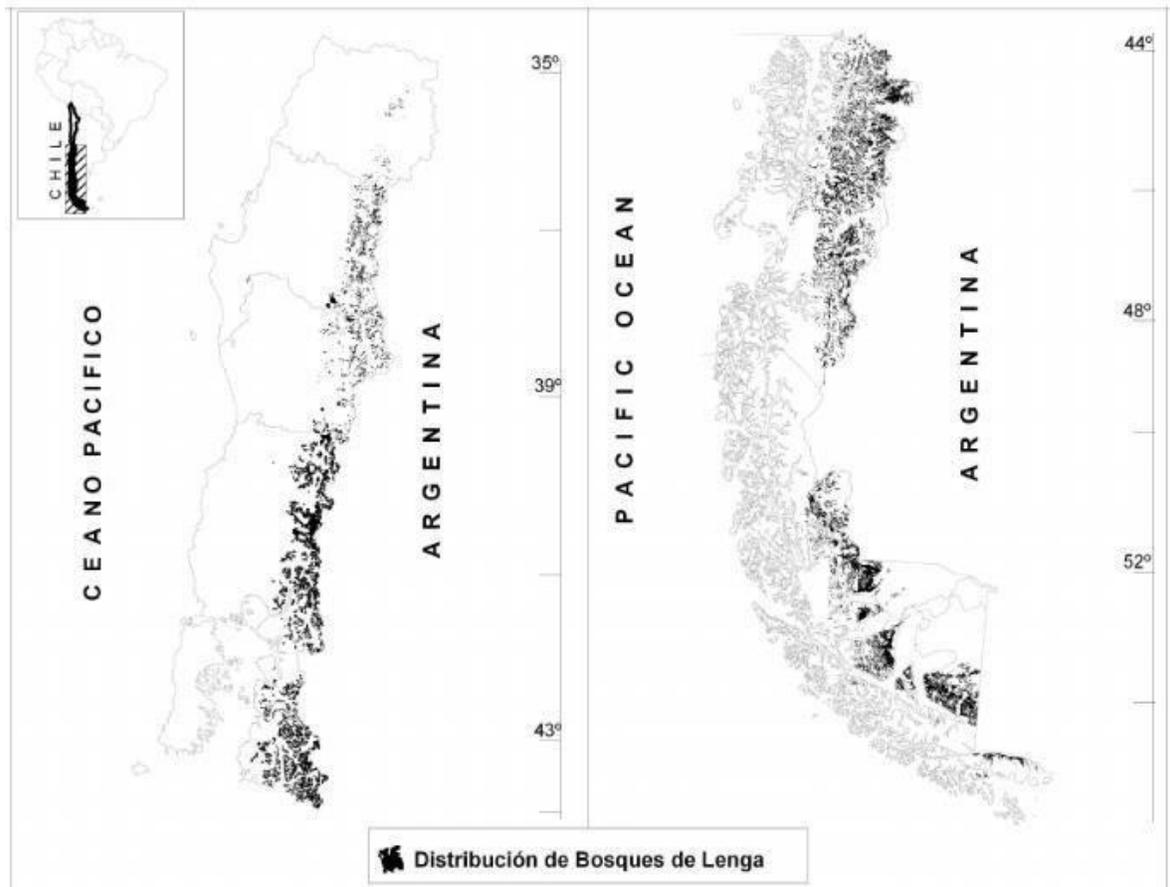
Watson, E., & Luckman, B. H. (2004). Tree-ring-based mass-balance estimates for the past 300 years at Peyto Glacier, Alberta, Canada. *Quaternary Research*, 62(1), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.04.007>

Weidemann, S. S., Sauter, T., Malz, P., Jaña, R., Arigony-Neto, J., Casassa, G., & Schneider, C. (2018). Glacier Mass Changes of Lake-Terminating Grey and Tyndall Glaciers at the Southern Patagonia Icefield Derived From Geodetic Observations and Energy and Mass Balance Modeling. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00081>

White, A., and Copland, L. (2015). Decadal-scale variations in glacier area changes across the Southern Patagonian Icefield since the 1970s. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 47(1), 147–167

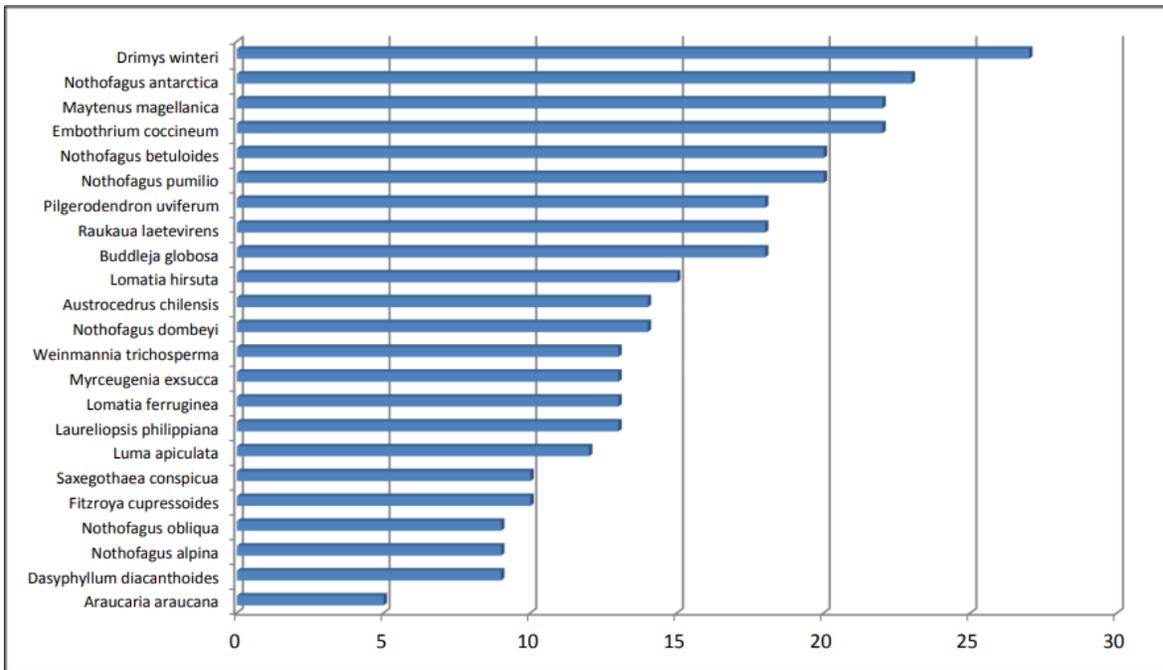
Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201–213. [https://www.ltrr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Wigley%20et%20al.%201984\\_EPS.pdf](https://www.ltrr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Wigley%20et%20al.%201984_EPS.pdf)

## ANEXOS



**Anexo 1:** Distribución de *Nothofagus pumilio* en Chile.

Fuente: González, Donoso, Ovalle y Martínez – Pastur (2006).



**Anexo 2:** Gráfico de barra que da cuenta de la extensión latitudinal de especies arbóreas que se encuentran entre los paralelos 30°S y 56°S. De arriba hacia abajo, en el puesto número 6 se encuentra la especie *Nothofagus pumilio*, la cual, se encuentra distribuida en la totalidad de 20 paralelos.

Fuente: Vera (2016).

Combinaciones de Banda		Aplicación principal/Descripción
Landsat 5	Landsat 8	
743	754	Combinación de infrarrojos
731	742	Geología/ Permite destacar elementos geológicos.
432	543	Infrarrojo Color/ Esta combinación da como resultado una imagen muy similar a la tradicional fotografía aérea infrarrojo color. Es útil para estudios de vegetación, patrones de suelos, crecimiento de cultivos y monitoreo de drenajes. La vegetación saludable tiende a una apariencia rojo brillante.
451	562	Combinación útil para distinguir vegetación saludable.

**Anexo 3:** Aplicación combinación de bandas Landsat 5 y Landsat 8. Fuente: Elaboración propia en base a Bravo (2017).

<p>Tasa de retroceso para el periodo <math>t_2-t_1 = \frac{At_2 - At_1}{t_2-t_1}</math></p> <p>Donde:</p> <p><math>t_1</math>: Año inicial del periodo</p> <p><math>t_2</math>: Año final del periodo</p> <p><math>At_1</math>: Área del glaciar en el año inicial del periodo</p> <p><math>At_2</math>: Área del glaciar en el año final del periodo</p>
---

**Anexo 4:** Cálculo de tasa de retroceso glaciar. Fuente: Ruiz, 2020.