



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

**Análisis comparativo de patrones de crecimiento de
Austrocedrus chilensis, en cronologías de ancho de anillos de la
Cordillera de la Costa y Cordillera de Los Andes de Chile central
durante el último milenio**

Patrocinante: Sr. Duncan Christie
Co Patrocinante: Sr. Carlos LeQuesne

Trabajo de Titulación como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales

VICENTE ANDRÉS SAN MARTÍN SILVA

VALDIVIA

2025


I	Calificación del Comité de Titulación	I
II	Agradecimientos	II
III	Dedicatoria	III
IV	Resumen	IV
1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Objetivo general	2
2.2	Objetivos específicos	2
3	MÉTODOS	3
3.1	Área de estudio	3
3.2	Colecta de muestras	4
3.3	Procesado de muestras	5
3.4	Construcción y reforzamiento de Cronologías	6
3.5	Caracterización climática y serie de tiempo	8
4	RESULTADOS	10
4.1	Estacionalidad climática: climogramas mensuales de ELA y ELB	10
4.2	Influencia de la temperatura en el crecimiento de <i>Austrocedrus chilensis</i> en ELB y ELA	12
4.3	Precipitación estival acumulada (DEF) contraste Andes–Costa	14
4.3.1	Distribución Temporal serie ELB (Andes)	15
4.3.2	Distribución Temporal serie ELA (Costa)	16
4.4	Construcción de cronologías	17
4.5	Comparación clima crecimiento al corto plazo	20
4.5.1	Comparación clima–crecimiento largo plazo (Costa vs. Andes)	23
5	DISCUSIÓN	27
5.1	Sensibilidad diferencial entre cordilleras	27
5.2	Mecanismos climáticos que explican el contraste ELB–ELA	28

5.3	Eventos extremos y coherencia entre sitios	28
5.4	Implicancias para la interpretación climática y ecológica	29
6	CONCLUSIONES	30
7	REFERENCIAS	32
Anexos	1 Precipitaciones Mensual Acumulada	36
	2 Relación entre la temperatura media estival ELB	37
	3 Relación entre la temperatura media estival ELA	37
	4 Secciones iniciales de las cronologías de <i>Austrocedrus chilensis</i> (SSS)	38

I. Calificación del Comité de Titulación

	Nota
Patrocinante: Sr. Duncan Christie	<u>6.3</u>
Co Patrocinante: Sr. Carlos LeQuesne	<u>6.0</u>
Informante: Sr. Felipe Flores	<u>6.3</u>
Informante: Sr. Manuel Suazo	<u>6.2</u>

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



Dr. Duncan Christie

II. Agradecimientos

El presente trabajo se enmarca en el Proyecto FONDECYT N°1241699, titulado ‘Southern Hemisphere westerly wind belt dynamics during the last millennium’, ejecutado por la Universidad Austral de Chile.

Agradezco especialmente al profesor Dr. Duncan Christie, quien actuó como patrocinante de este trabajo, por su orientación, apoyo constante y compromiso durante todo el desarrollo de esta investigación.

Extiendo mi agradecimiento a Felipe Flores y Manuel Suazo, quienes actuaron como informantes, por su colaboración, disposición y valiosa asistencia tanto en las etapas prácticas, analíticas como en las discusiones y el desarrollo de este trabajo.

Al Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile, por facilitar el espacio, los recursos y el ambiente académico necesarios para la realización de este estudio.

Agradezco también al profesor Dr. Carlos LeQuesne, por su disposición a colaborar y la generosa entrega de su tiempo para compartir su experiencia y conocimientos.

Finalmente, a todas las personas que conforman el laboratorio, por su compañerismo, apoyo y por contribuir a un entorno de trabajo colaborativo que enriquece tanto lo académico como lo humano.

III Dedicatoria

A los pilares de mi vida.

A mis hermanas, por haberme recibido, con paciencia, sin presiones y con amor.

A mis sobrinos, por haberme molestado con cariño, por confiar en mí y permitirme acompañar parte de su crecimiento.

A mi padre, por su enorme paciencia, por escucharme, apoyarme en todo momento y tratar de comprender a su hijo complicado.

Y a mi madre, pilar de mi crecimiento. Por soportar noches de frustración, por su amor a la distancia, por escuchar cada una de mis dificultades, por los queques escondidos en la mochila y por cada gesto de amor. Gracias por ser la madre que necesitaba en mi vida.

Un “te amo” al cielo y un “Te amo” a todos por la paciencia y compañía.

Estés donde estés, hagas lo que hagas, digas lo que digas. La mamá te ama.

IV. Resumen

La región central de Chile ($\sim 28^{\circ}$ – 40° S) se caracteriza por un clima mediterráneo, con inviernos lluviosos y veranos secos regulados por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur. Este sistema genera condiciones cálidas y secas durante el verano; sin embargo, las perturbaciones extratropicales asociadas al paso de sistemas frontales, junto con eventos de precipitación convectiva, provocan episodios estivales de lluvia principalmente en sectores cordilleranos, mientras que en zonas de menor altitud estas precipitaciones no se manifiestan.

Este estudio tuvo como objetivo comparar los patrones de crecimiento de *Austrocedrus chilensis* entre la cordillera de la Costa y la cordillera de los Andes en Chile central durante el último milenio. Para ello, se actualizaron y analizaron cronologías de ancho de anillo en dos sitios: El Baule (cordillera de los Andes) y El Asiento (cordillera de la Costa). Las muestras recolectadas fueron procesadas mediante técnicas dendrocronológicas estándar, aplicándose procedimientos de datación cruzada, estandarización y evaluación de la señal común.

Los resultados evidenciaron diferencias en la sensibilidad interanual y en las tendencias de largo plazo entre ambas cordilleras. El sitio andino presentó una respuesta más marcada a la variabilidad de la precipitación estival, mientras que el sitio costero mostró un patrón de crecimiento más estable. Estas diferencias reflejaron los contrastes climáticos condicionados por efectos orográficos sobre el crecimiento radial de *A. chilensis* y permitieron mejorar la comprensión de las variaciones hidroclimáticas en Chile central durante el último milenio.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye un fenómeno ampliamente documentado y acelerado desde la revolución industrial, impulsado principalmente por el incremento de gases de efecto invernadero derivados de actividades humanas (IPCC 2021). En Chile central, este proceso se manifiesta mediante una disminución sostenida de las precipitaciones y un aumento de la temperatura media, lo que ha reducido la disponibilidad hídrica y alterado la dinámica ecológica de los ecosistemas boscosos de la región (Arias et al. 2021).

La zona central de Chile presenta un clima de tipo mediterráneo, caracterizado por inviernos lluviosos y veranos secos, cuya estacionalidad está fuertemente modulada por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur. Este sistema de alta presión domina durante la estación estival y genera condiciones cálidas y áridas, restringiendo los aportes de humedad hacia la cordillera de los Andes. No obstante, perturbaciones extratropicales ocasionales pueden generar precipitaciones veraniegas episódicas, particularmente en sectores de mayor altitud (Garreaud y Rutllant 1997). Estos eventos, aunque escasos, tienden a ocurrir entre cinco y seis veces por temporada, con duraciones breves que varían entre uno y ocho días y una moda cercana a 2,5 días.

En este contexto, los árboles constituyen registros naturales de alta resolución debido a su capacidad para integrar las condiciones ambientales en sus anillos de crecimiento. La dendrocronología permite interpretar estos patrones mediante técnicas de datación cruzada y análisis de la variabilidad interanual y multidecadal (Stokes y Smiley 1996). La especie *Austrocedrus chilensis* destaca por su longevidad, su presencia en ambientes xéricos y su sensibilidad a la disponibilidad hídrica estival, lo que la convierte en un indicador clave de la variabilidad climática en Chile central (Hoffmann 2005). Diversos estudios evidencian su utilidad para reconstruir precipitaciones y sequías de los últimos siglos (Le Quesne et al. 2006, Christie et al. 2009), confirmando su valor como archivo climático natural.

A pesar de estos avances, persisten vacíos en la comprensión de cómo difieren los patrones de crecimiento de *A. chilensis* a lo largo del gradiente topográfico Costa–Andes. Las diferencias en altitud, exposición, disponibilidad hídrica y frecuencia de eventos de precipitación sugieren que la señal climática registrada por la especie podría variar de manera significativa entre ambas cordilleras.

Comprender estas diferencias es fundamental para mejorar la interpretación de la variabilidad hidroclimática reciente y para evaluar la respuesta de los bosques relictos frente a escenarios de aridificación creciente.

Considerando lo anterior, este estudio compara los patrones de crecimiento radial de *Austrocedrus chilensis* entre la cordillera de la Costa (sector El Asiento) y la cordillera de los Andes (sector El Baule), utilizando cronologías de ancho de anillo desarrolladas para el último milenio. Asimismo, analiza las señales de alta y baja frecuencia contenidas en estas cronologías con el fin de aportar a la comprensión de las variaciones climáticas que han afectado a Chile central durante este periodo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general:

Desarrollar un análisis comparativo entre los patrones de crecimiento de *Austrocedrus chilensis* entre dos sitios de la Cordillera de la Costa y de la Cordillera de los Andes en Chile central durante el último milenio.

2.2. Objetivos específicos:

Actualizar y reforzar la cronología andina de ancho de anillos de *Austrocedrus chilensis* del sector El Baule (ELB).

Explorar la relación entre el crecimiento radial de *A. chilensis* y la variabilidad climática estival utilizando la cronología de ELB y la de la cordillera de la costa de El Asiento (ELA).

Comparar las señales de alta y baja frecuencia registradas en las cronologías de ambos sitios, con el fin de identificar divergencias y similitudes en la respuesta climática a lo largo del último milenio.

3. MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El área de estudio correspondió al sector El Baule (ELB), ubicado en la Reserva Nacional Río Los Cipreses, comuna de Machalí, provincia de Cachapoal, región de O'Higgins. Esta reserva, administrada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), fue creada el 17 de octubre de 1985 y abarcó aproximadamente 38.582 hectáreas (Conaf 2016). El sector se localizó en la parte baja del valle del río Los Cipreses, curso que se originó en el glaciar Los Cipreses y desembocó en el río Cachapoal, constituyendo una fuente relevante de abastecimiento hídrico para la región.

El valle asociado al sector El Baule (ELB), ubicado en las coordenadas -34.49° S y -70.44° O (figura 1), presentó una orientación norte-sur y un rango altitudinal entre 1.200 y 1.700 m s. n. m., mientras que los picos montañosos circundantes alcanzaron alturas entre 3.000 y 4.860 m s. n. m.

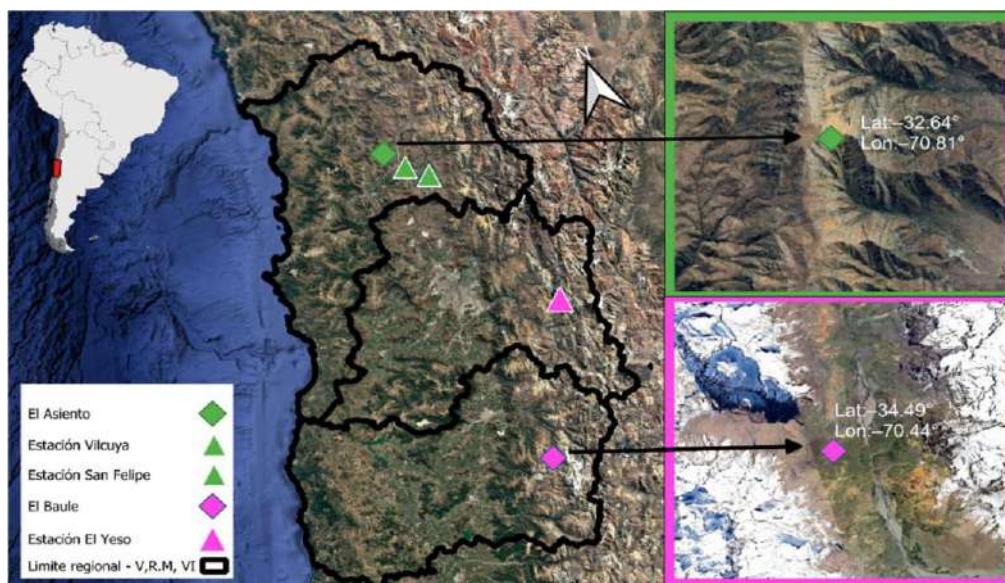


Figura 1. Localización de los sitios de estudio El Asiento (Cordillera de la Costa) y El Baule (Cordillera de los Andes), junto con las estaciones climáticas de referencia utilizadas (El Yeso, San Felipe y Vilcuya). En los recuadros se muestran vistas satelitales detalladas de ambos sitios.

El sector El Asiento se ubicó en la ladera oriental del cerro Tabaco, comuna de San Felipe -32.64° S, -70.81° O (figura 1), en la cordillera de la Costa de Chile central (Jara y Charrier 2014). El predio, de aproximadamente 1.115 ha, fue declarado Santuario de la Naturaleza Serranía El Ciprés mediante el Decreto Exento N.º 698 del 30 de mayo de 2006 (Ministerio de Educación de Chile 2006), con el objetivo de resguardar el límite norte de distribución de *Austrocedrus chilensis* (Ministerio del Medio Ambiente 2023). El rango altitudinal del sector osciló entre ~ 1.000 m s. n. m. en el fondo de quebrada y más de 2.300 m s. n. m. en las crestas, configurando pendientes abruptas y microclimas contrastantes (Finot et al. 2018).

Desde el punto de vista geológico, la serranía correspondió a cordones metamórfico intrusivos de la cordillera de la Costa, dominados por rocas porfíricas y esquistos que dieron origen a suelos delgados, pedregosos y con baja capacidad de retención hídrica, presentando pendientes superiores al 35 % (Andeshandbook 2023). Estas condiciones edáficas, junto con las exposiciones norte y nor-poniente, intensificaron el estrés hídrico estival característico del sitio.

3.2. Colecta de muestras

Se recolectaron 16 rodela de árboles muertos de *Austrocedrus chilensis* en el sector El Baule (ELB), ubicado dentro de la Reserva Nacional Río de los Cipreses. Las muestras fueron obtenidas en noviembre de 2022 por Pia Doreen Maier, en el marco del proyecto FONDECYT N.º 1221307 “Evolución del riesgo de heladas tardías en Chile central: 500 años de variabilidad y cambios”, bajo la supervisión del Dr. Carlos Le Quesne y con el apoyo del Laboratorio de Dendrocronología y cambio global de la Universidad Austral de Chile.

La colecta se realizó mediante el uso de motosierra sobre troncos muertos ubicados en superficie o parcialmente enterrados bajo material coluvial y rocoso, siguiendo los procedimientos estándar para la obtención de secciones transversales utilizados en estudios dendrocronológicos (Stokes y Smiley 1996). Cada rodela fue etiquetada con un número identificador, registrándose su longitud, la altura de extracción y observaciones relevantes, tales como la posición en el terreno, el grado de meteorización y la presencia de quemaduras.

De las 16 muestras recolectadas, ocho conservaron su centro visible, mientras que las otras ocho no presentaron médula. La presencia del centro fue fundamental para determinar con precisión el año de establecimiento del árbol, ya que permitió identificar el primer anillo de crecimiento. Como las rodela correspondieron a material sin fecha conocida de caída, se trataron como muestras flotantes y se les aplicó datación cruzada siguiendo la convención de Schulman (1956) y los lineamientos de Stokes y Smiley (1996).

La mayoría de las 16 muestras trabajadas presentó un deterioro considerable en las zonas más externas, especialmente entre la corteza y la albura, producto de la meteorización y de la exposición prolongada a condiciones ambientales variables. Este deterioro dificultó en algunos casos la identificación de los anillos más recientes y fue registrado como parte del proceso de evaluación inicial de cada muestra.

3.3. Procesado de muestras

Las muestras recolectadas fueron procesadas en el Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global y en la Xiloteca del Instituto de Conservación, Biodiversidad y Territorio. Para facilitar el lijado y asegurar la estabilidad durante el proceso, la mayoría de las rodela se fijaron en tablas mediante tornillos, lo que permitió nivelar la superficie y mantener un control adecuado durante el pulido.

En primera instancia, se utilizó una lijadora de banda equipada con lijas de grano grueso (P50 y P80), correspondientes a granulometría abrasiva estándar según la escala FEPA, con el objetivo de eliminar restos de corteza, impurezas superficiales y homogenizar el plano de la rodela. Posteriormente, se empleó una lijadora orbital con lija de grano medio (P100) para remover las marcas generadas por la lijadora de banda y mejorar la visibilidad preliminar de los anillos de crecimiento. De manera final, se realizó un pulido progresivo mediante el uso de lijas de grano fino y de granulometría incrementalmente más delicada, siguiendo la secuencia habitual de refinamiento utilizada en procedimientos dendrocronológicos (figura 2).

P100 → P220 → P400 → P500 → P600 → P800

Este procedimiento permitió obtener una superficie lisa y pulida, apta para la identificación clara y precisa de los anillos durante las etapas de conteo y medición, tal como se describe en los procedimientos estándar de Stokes y Smiley (1996).



Figura 2. Rodelas de *Austrocedrus chilensis* fijadas en soportes de madera durante el proceso de lijado y pulido en la Xiloteca del Laboratorio de Dendrocronología y cambio global de la Universidad Austral de Chile.

3.4. Construcción y reforzamiento de Cronologías

Para la construcción de la cronología, se asignó un número correlativo a cada anillo de crecimiento, comenzando con el valor 0 en el centro de la rodela o en el punto más cercano a la médula cuando esta no era claramente visible. A partir de este punto, se asignaron valores ascendentes conforme los anillos se acercaban al borde, albura o corteza, según fuera posible. Para facilitar el proceso de conteo y verificación posterior, se incorporaron marcas de control cada 10, 50 y 100 años, lo que permitió reforzar la consistencia interna de la numeración de los anillos (cuadro 1).

Simbología		
10 años	50 años	100 años
●	● ●	● ● ●
Anillo ausente		Anillo falso
○		∅

Cuadro 1. Simbología utilizada en conteo y fechado. Según metodología Stokes y Smiley (1996).

Este procedimiento siguió la convención establecida por Schulman (1956), la cual permitió datar cada anillo de crecimiento con el año calendario correspondiente a su formación. Posteriormente, los anchos de los anillos fueron medidos utilizando un carro de medición Velmex, con una precisión de 0,001 mm. Los datos obtenidos se registraron en el computador y fueron analizados mediante el software COFECHA (Holmes 1983), el cual permitió verificar la calidad de las mediciones y detectar posibles errores en la datación o en la identificación de los anillos.

Además, dado que la representatividad estadística de una cronología depende de la coherencia entre sus series individuales, se incorporó el índice Expressed Population Signal (EPS), el cual cuantifica la similitud entre la cronología obtenida y una cronología hipotética que reflejaría el comportamiento promedio de la población de árboles en un intervalo común. Se utilizó el umbral $EPS \geq 0,85$ como criterio para identificar los segmentos temporalmente robustos de la cronología, siguiendo el estándar propuesto por Wigley et al. (1984) y consolidado en la metodología dendrocronológica clásica por Cook y Kairiukstis (1990).

Para la construcción final de las cronologías, se implementó en RStudio un flujo metodológico equivalente al sistema ARSTAN descrito por Cook y Holmes (1984) y por Cook y Kairiukstis (1990), utilizando el paquete dplR (Bunn 2008). Cada serie individual fue ajustada para remover las tendencias asociadas a la edad y la variación no climática del crecimiento radial, siguiendo los procedimientos clásicos de estandarización utilizados en dendrocronología. Posteriormente, la cronología compuesta se obtuvo mediante media robusta utilizando la función `chron()`. Este proceso generó dos versiones: (i) la cronología estándar (STD), que preservó la señal de baja frecuencia vinculada a variaciones climáticas

de largo plazo, y (ii) la cronología residual (RES), que enfatizó la variabilidad interanual luego de eliminar la autocorrelación presente en las series individuales antes del promediado.

3.5. Caracterización climática y serie de tiempo

Para caracterizar climáticamente los sitios de estudio, se utilizaron datos observados provenientes de estaciones meteorológicas y datos grillados del producto CR2MET v2.5 (Boisier 2023). Cada fuente alimentó figuras distintas según la variable analizada (temperatura o precipitación) y el propósito específico del análisis.

En primer lugar, la temperatura se caracterizó mediante el producto grillado CR2MET v2.5, el cual entregó series continuas de temperatura mínima (T_{\min}) y máxima (T_{\max}) para el periodo 1960–2021, con una resolución espacial de $0,05^\circ$. A partir de los archivos NetCDF diarios, se extrajeron los valores correspondientes a las coordenadas representativas de cada sitio (ELB: -34.49° , -70.44° ; ELA: -32.64° , -70.81°). Con estos registros, se calculó la temperatura media diaria mediante un promedio simple, definido como:

$$T_{\text{media}} = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} \quad (1)$$

Los valores diarios se agruparon posteriormente por mes y año para obtener la temperatura media mensual y la temperatura media estival (DEF) en el periodo 1960–2021. Estas series se utilizaron para construir la figura 3, la cual muestra la temperatura media estival para ambos sitios. El producto CR2MET v2.5 (Boisier 2023) se empleó para la temperatura debido a que permitió obtener series completas y comparables entre cordilleras, superando las lagunas presentes en los registros observados.

En segundo lugar, la precipitación provino exclusivamente de datos observados en estaciones meteorológicas. Para ELB, se utilizaron los registros diarios de precipitación de la estación El Yeso (DGA) (-33.67° , -70.08°), mientras que para ELA se empleó la estación San Felipe (DMC) (-32.75° , -70.70°), con datos disponibles desde 1965. Los registros fueron trabajados en formato CSV y posteriormente agregados a escala mensual. A partir de estos valores se construyó la precipitación estival acumulada (PP-DEF) sumando diciembre, enero y febrero, asignándose el mes de diciembre al año

siguiente según el criterio dendroclimático. Estas series se utilizaron para generar la figura 4, la cual presenta la precipitación estival para ambos sitios en el periodo 1965–2017, dado que toda la PP empleada en los análisis provino exclusivamente de estaciones meteorológicas.

Luego, se generaron los climogramas mensuales para ELB y ELA (figura 5). Para ello, la precipitación mensual provino de las estaciones El Yeso (ELB) y San Felipe (ELA), mientras que la temperatura mensual se obtuvo de CR2MET, lo que permitió contar con una serie térmica continua desde 1960. Esta integración permitió representar la estacionalidad climática de cada sitio. En el caso de ELA, donde se dispuso de dos estaciones diferentes inicialmente (San Felipe para precipitación y Vilcuya para temperatura observada), no se unieron registros observacionales de temperatura, ya que la serie térmica utilizada en las figuras provino exclusivamente de CR2MET. La consistencia entre las temperaturas observadas y las derivadas de CR2MET fue verificada en su periodo común, confirmando su adecuación como base térmica para los análisis posteriores.

Para la construcción de los climogramas mensuales (figura 5), se integraron las series de precipitación mensual observada y la temperatura media mensual derivada del producto CR2MET v2.5. Los climogramas se elaboraron siguiendo el formato clásico, donde la precipitación se representa mediante barras y la temperatura mediante una línea continua, permitiendo sintetizar la estacionalidad térmica e hídrica de ambos sitios bajo un marco temporal comparable. El uso de datos grillados para la temperatura se justificó por su continuidad temporal y su homogeneidad espacial, atributos necesarios para comparar sitios ubicados en cordilleras distintas y para evitar discontinuidades asociadas a cambios operacionales o lagunas en las estaciones meteorológicas.

Con el fin de respaldar metodológicamente esta elección, se realizó una validación independiente entre la temperatura media estival observada y la derivada desde CR2MET. Para ello, se construyeron diagramas de dispersión (CR2MET en el eje X y estación en el eje Y) para cada sitio y se estimó la correlación de Pearson en el período común. En ELB, la correlación fue ($r = 0,79$), mientras que en ELA se obtuvo la siguiente correlación ($r = 0,67$), valores consistentes con las diferencias fisiográficas entre estaciones y sitios. Estas validaciones confirmaron que CR2MET reproduce adecuadamente la variabilidad térmica interanual, por lo que se empleó como base para la construcción de los climogramas y los análisis posteriores. Las figuras y el procedimiento detallado se incluyen en anexos.

4. RESULTADOS

4.1. Estacionalidad climática: climogramas mensuales de ELA y ELB

Los climogramas mensuales evidenciaron un régimen mediterráneo en ambos sitios, caracterizado por veranos secos (DEF) y un máximo invernal de precipitaciones (JJA–SON). En ELA (cordillera de la Costa), la precipitación mensual fue baja durante gran parte del año y alcanzó sus medianas más altas entre junio y julio, con dispersión moderada. La temperatura media mostró valores más elevados y una amplitud anual atenuada, con aproximadamente 20 °C en enero y 11–12 °C en julio, en concordancia con la influencia marítima.

En ELB (cordillera de los Andes), la precipitación presentó un pico invernal más amplio y de mayor magnitud, con medianas altas entre mayo y agosto y la presencia de eventos extremos reflejados en los outliers. La temperatura exhibió un ciclo anual más contrastado, con veranos templados e inviernos fríos, destacando un mínimo invernal pronunciado. En conjunto, esta estacionalidad mostró veranos secos e inviernos húmedos, con un incremento del aporte hídrico hacia sectores de mayor altitud en la zona central de Chile.

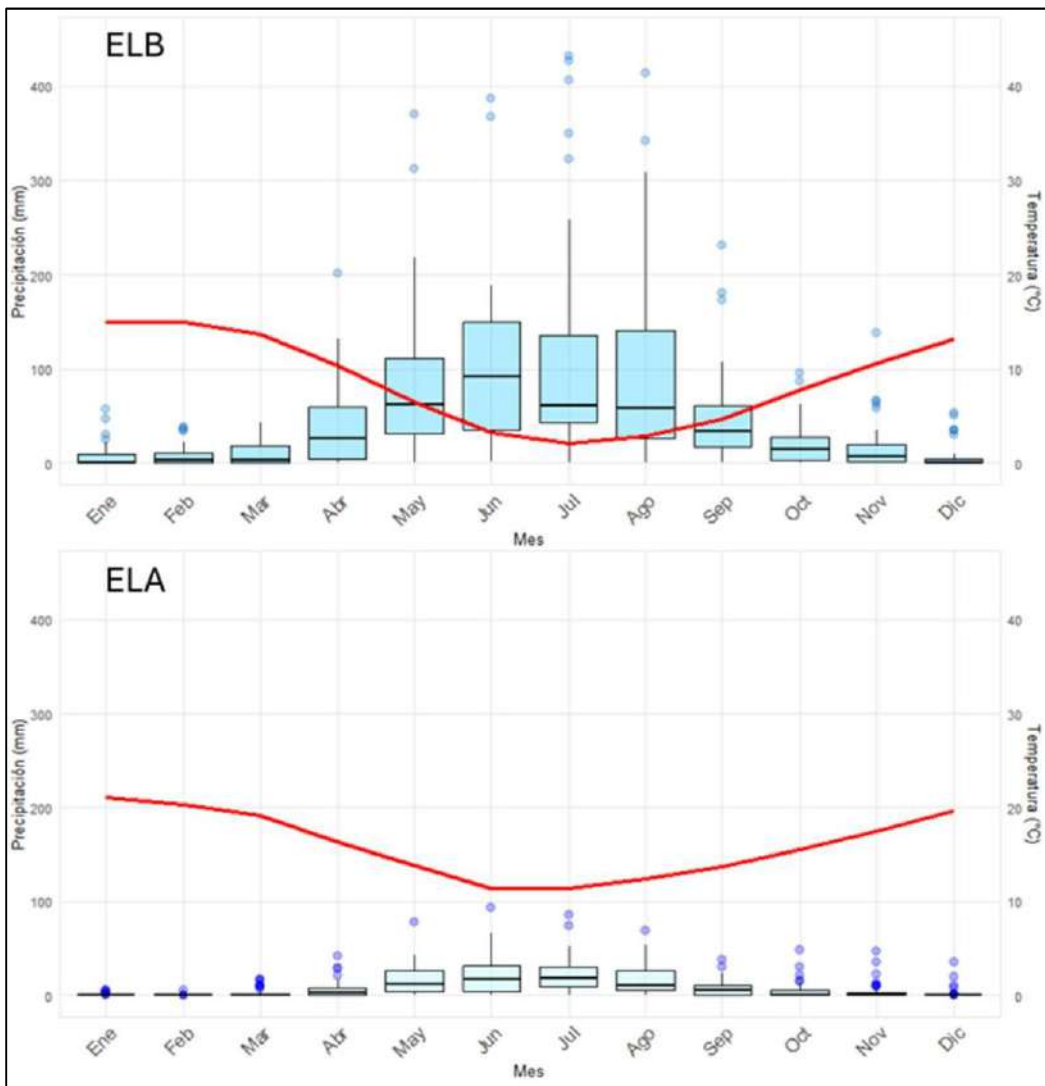


Figura 3. Climogramas mensuales para los sitios El Baule (ELB) y El Asiento (ELA), contruidos a partir de la precipitación mensual observada en estaciones (El Yeso para ELB y San Felipe para ELA), combinada con la temperatura media mensual derivada del producto grillado CR2MET v2.5 para el periodo 1960–2021. Fuente de datos DGA, DMC y CR2MET (Boisier 2023).

4.2. Influencia de la temperatura en el crecimiento de *Austrocedrus chilensis* en ELB y ELA

La temperatura media estival (DEF) mostró un aumento progresivo en ambos sitios desde mediados del siglo XX, con una aceleración evidente a partir de fines de los años 1990. Según los registros CR2MET, ELA presentó valores aproximadamente 2–3 °C más altos que ELB durante el verano, diferencia coherente con el gradiente altitudinal entre ambos sitios (ELA \approx 1.000–1.300 m s. n. m.; ELB \approx 1.200–1.700 m s. n. m.). Asimismo, la cordillera de la Costa mantuvo temperaturas estivales más elevadas debido a la menor altitud y a la influencia moderadora del océano, lo que generó una amplitud térmica reducida en comparación con el sector andino.

A escala regional, este patrón coincidió con estimaciones climáticas que reportaron una tendencia de calentamiento de aproximadamente 0,12–0,18 °C por década en Chile central durante la segunda mitad del siglo XX (Garreaud et al. 2009). No obstante, estudios basados en reanálisis y estaciones meteorológicas mostraron que la señal no fue espacialmente uniforme. Por ejemplo, para el periodo 1979–2006 se identificó un ligero enfriamiento en estaciones costeras del norte-centro, simultáneo a un calentamiento en el interior y en el borde andino (Falvey y Garreaud 2009), lo que reflejó la dependencia de la tendencia térmica respecto del emplazamiento geográfico y del periodo analizado. El diagnóstico climático nacional más reciente (Dirección General de Aeronáutica Civil 2023) también destacó esta heterogeneidad espacial, indicando que los gradientes térmicos entre costa e interior pueden intensificarse bajo condiciones persistentes del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur.

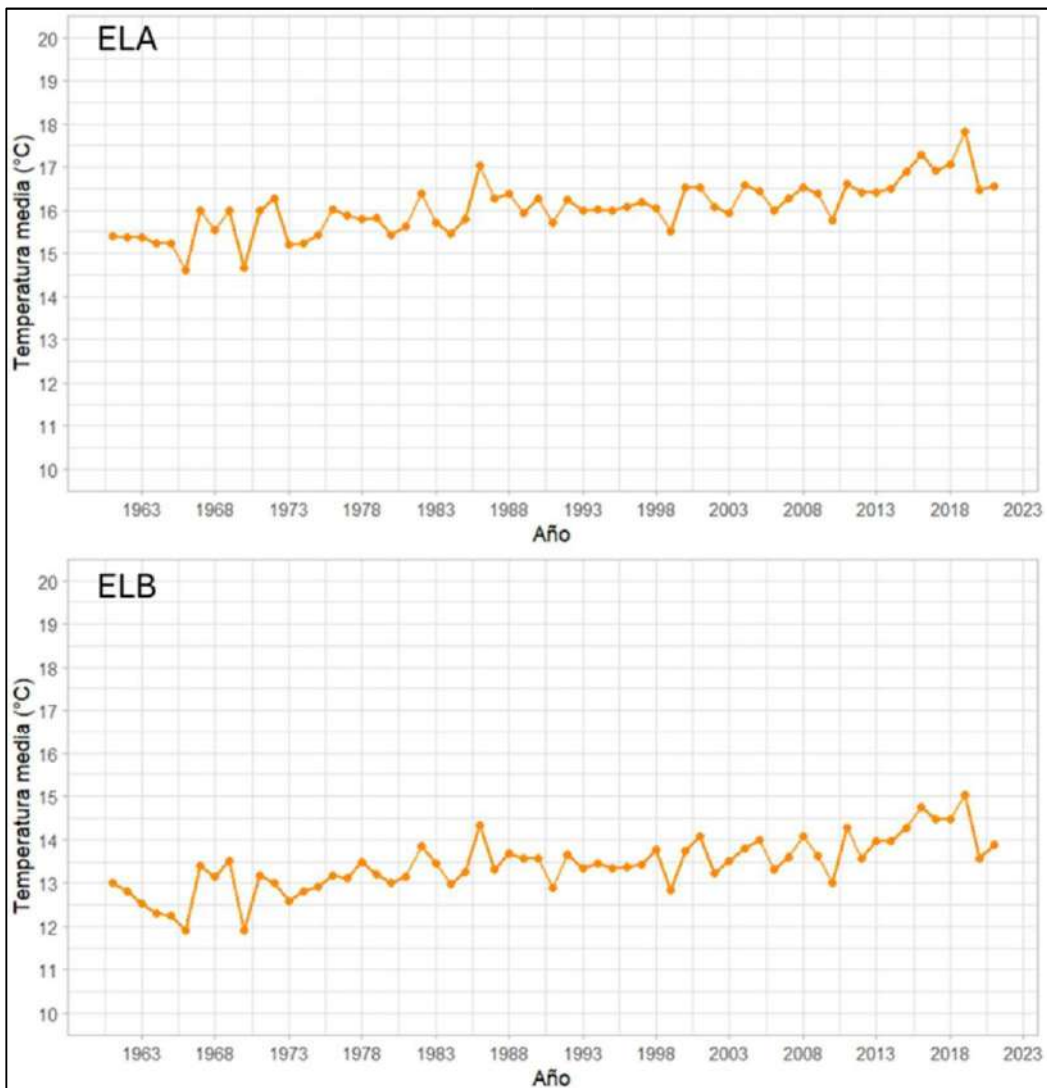


Figura 4. Temperatura media estival (promedio DEF) para los sitios El Asiento (ELA) y El Baule (ELB) durante el periodo 1960–2021, obtenida a partir del producto climático grillado CR2MET v2.5. Fuente: Elaboración a partir de CR2MET (Boisier 2023).

4.3. Precipitación estival acumulada (DEF) contraste Andes–Costa

La precipitación estival acumulada (DEF) mostró un contraste marcado entre ambos sitios. En ELB (Andes), la serie presentó oscilaciones amplias, alternando entre veranos prácticamente secos y pulsos húmedos que superaron los 40 mm en algunos años. En contraste, en ELA (cordillera de la Costa) la precipitación estival fue prácticamente nula en la mayoría de los años, con solo algunos eventos aislados asociados a condiciones atmosféricas poco frecuentes. Esta diferencia reflejó el régimen mediterráneo de Chile central, donde el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur domina durante el verano y limita la ocurrencia de precipitaciones (Garreaud et al. 2009).

Bajo este patrón de circulación, el aporte estival representó habitualmente menos del 10 % de la precipitación anual en la vertiente occidental, incrementándose gradualmente hacia sectores de mayor altitud y proximidad a la divisoria andina, donde la inestabilidad atmosférica fue relativamente mayor y favoreció la ocurrencia de pulsos convectivos estivales. Este mecanismo fue coherente con los pulsos húmedos observados en ELB, los cuales reflejaron la influencia combinada de la topografía andina y de episodios ocasionales de inestabilidad capaces de generar precipitaciones estivales localizadas en altura (Garreaud et al. 2009). En la cordillera de la Costa, en cambio, la estabilidad impuesta por el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur redujo drásticamente la posibilidad de eventos estivales significativos, lo que explicó el carácter casi nulo de la serie registrada en ELA.

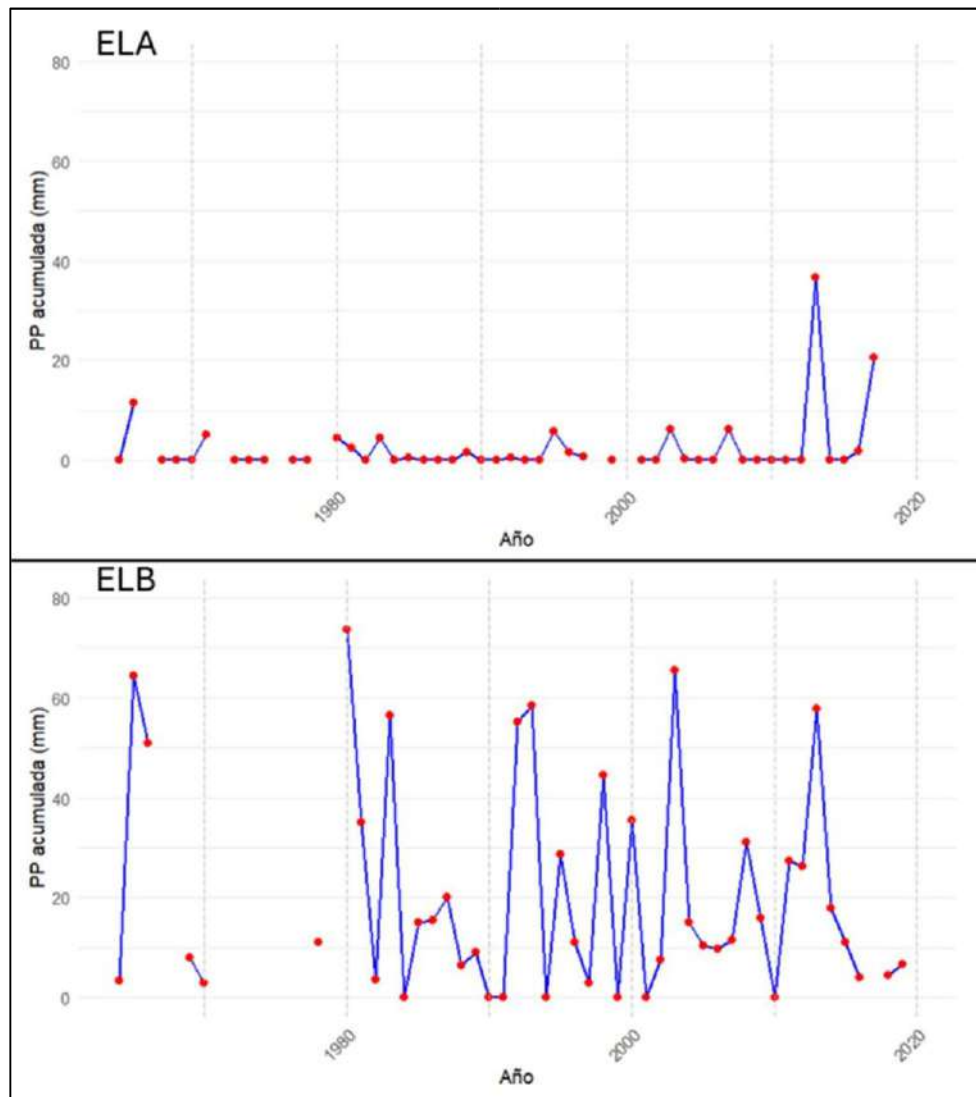


Figura 5. Precipitación acumulada estival (diciembre–febrero) para los sitios El Asiento (ELA) y El Baule (ELB) durante el período 1965–2017, obtenida a partir de registros de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA). Los espacios en blanco corresponden a valores NA. Fuente de datos DGA.

4.3.1. Distribución Temporal serie ELB (Andes)

La cronología de *Austrocedrus chilensis* en ELB abarcó el periodo 700–2021 y estuvo compuesta por 224 series, alcanzando un máximo de 120 series simultáneas (N máx). La intercorrelación media (\bar{r}) fue de 0,216 y la sensibilidad media (MS) de 0,258. La autocorrelación de primer orden de la cronología

estándar (AC1) alcanzó un valor de 0,453. La robustez estadística expresada por el índice EPS alcanzó valores $\geq 0,85$ desde el año 904, a partir del cual la serie fue truncada para los análisis comparativos (figura 6).

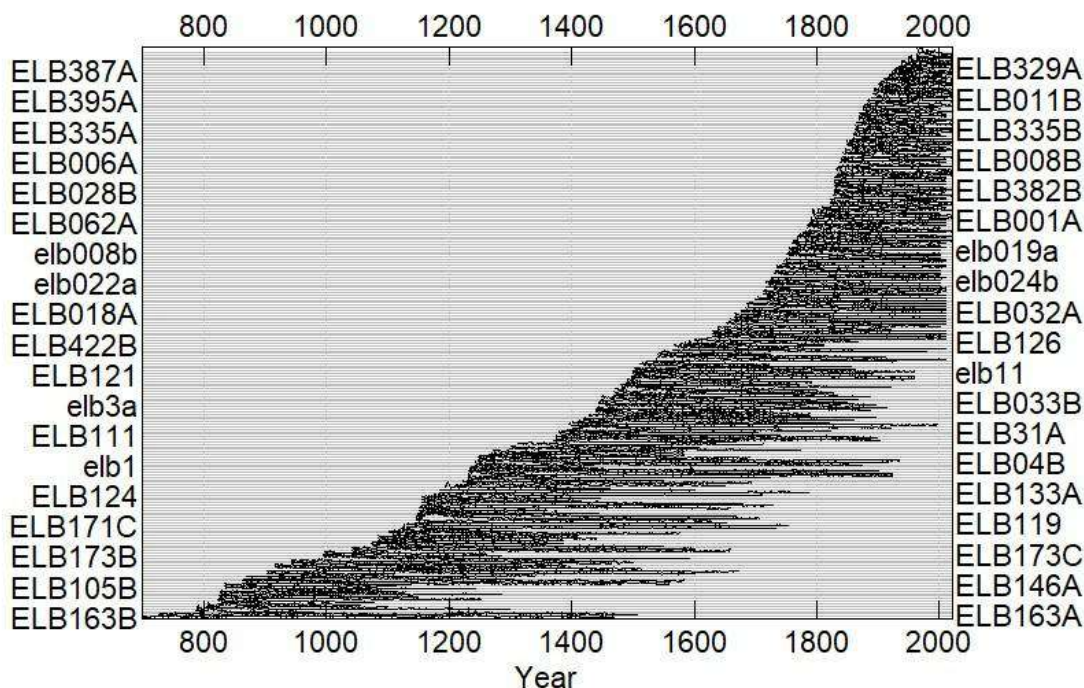


Figura 6. Distribución temporal de las series de ancho de anillos individuales utilizadas para la construcción de la cronología de *Austrocedrus chilensis* en el sitio El Baule (ELB). Cada línea corresponde a una serie de crecimiento individual y al intervalo temporal que abarca.

4.3.2. Distribución Temporal serie ELA (Costa)

La cronología de *Austrocedrus chilensis* en ELA cubrió el periodo 451–2017 y estuvo compuesta por 210 series, alcanzando un máximo de 143 series simultáneas (N máx). La intercorrelación media (\bar{r}) fue de 0,261, la sensibilidad media (MS) de 0,292 y la autocorrelación de primer orden de la cronología estándar (AC1) alcanzó 0,568. La robustez estadística expresada por el índice EPS alcanzó valores $\geq 0,85$ desde el año 771 (figura 7), intervalo que fue adoptado para la comparación con ELB.

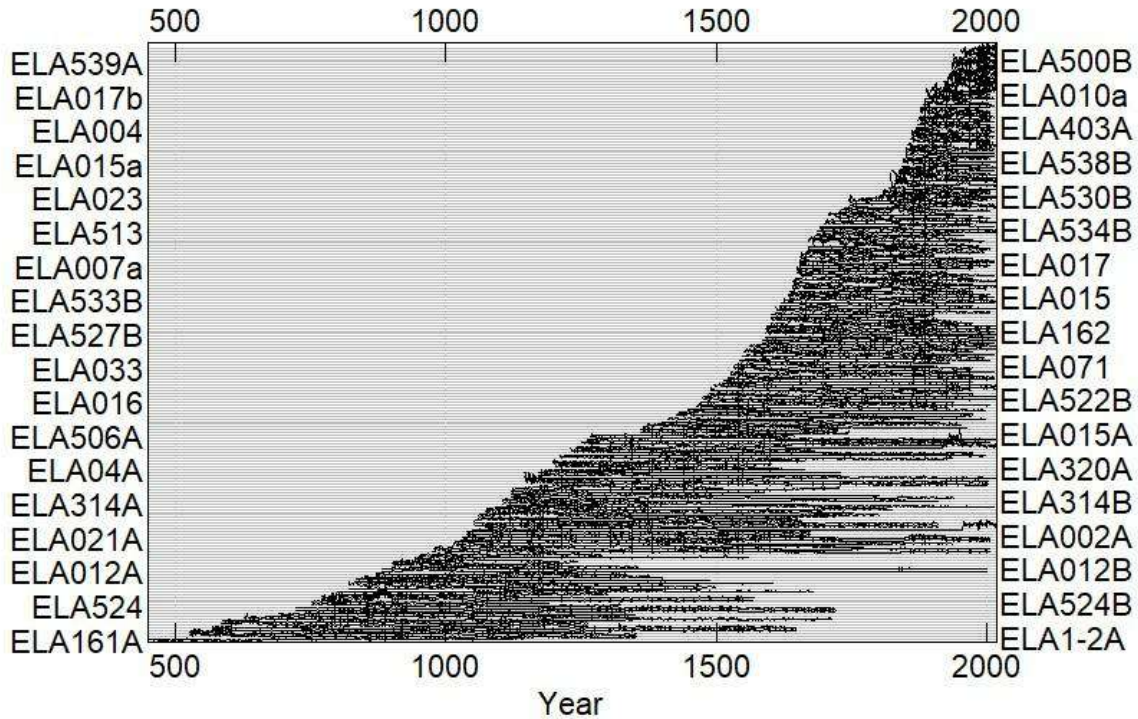


Figura 7. Distribución temporal de las series de ancho de anillos individuales utilizadas para la construcción de la cronología de *Austrocedrus chilensis* en el sitio El Asiento (ELA). Cada línea corresponde a una serie de crecimiento individual y al intervalo temporal que abarca.

4.4. Construcción de cronologías

Se obtuvieron cronologías estándar (STD) y residuales (RES) para ambos sitios a partir de las series ajustadas mediante una curva exponencial negativa (ModNegExp). En El Baule (ELB), la cronología se extendió desde 700 hasta 2021, mientras que en El Asiento (ELA) el registro abarcó el periodo 451–2017. Las cronologías STD mostraron variaciones de baja frecuencia relativamente estables a lo largo del periodo, mientras que las cronologías RES exhibieron una señal interanual más marcada, coherente con la eliminación de la autocorrelación previa al promediado. La profundidad muestral (N) aumentó progresivamente desde los segmentos más antiguos hasta alcanzar sus valores máximos, con N = 120 en ELB y N = 143 en ELA. Estos patrones generales se observaron en la figura 8.

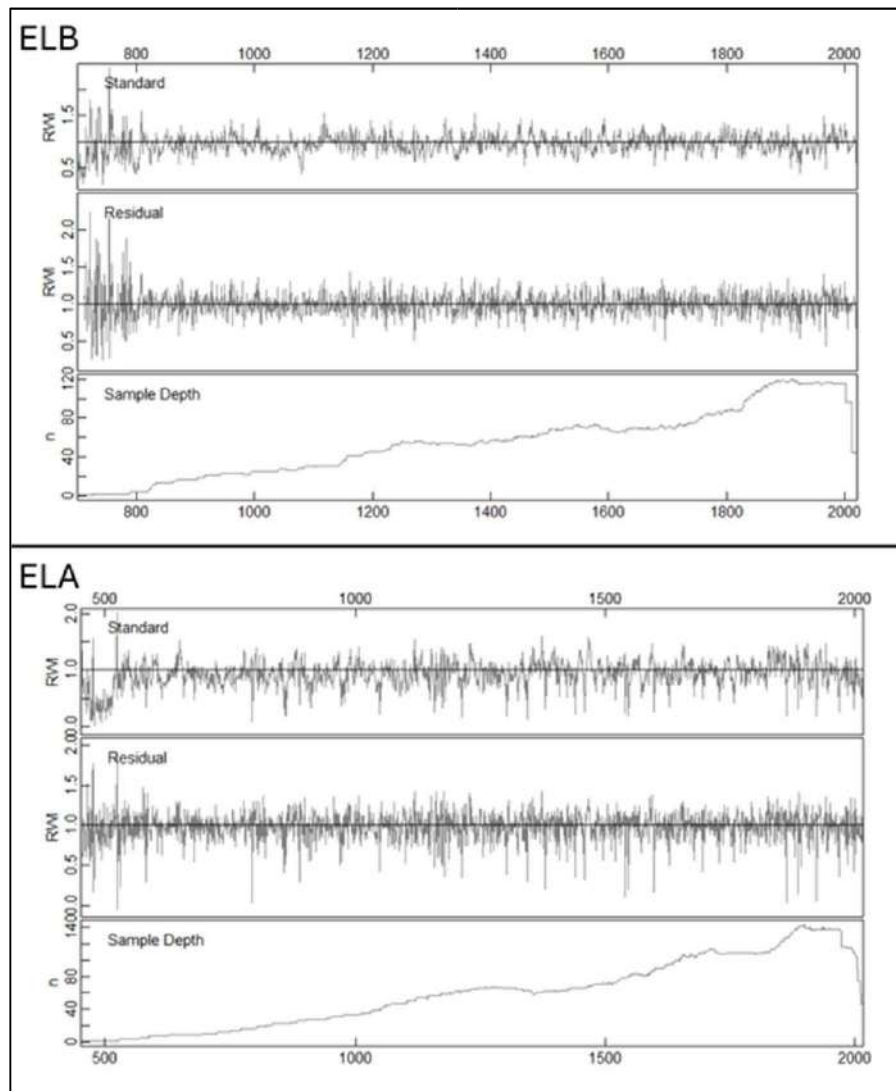


Figura 8. Cronologías estándar, residual y profundidad muestral (Sample Depth) para los sitios El Baule (arriba) y El Asiento (abajo), obtenidas mediante el paquete dplr en R a partir de series tendenciadas con el método de curva exponencial negativa.

En El Baule (ELB), la cronología STD mostró variaciones interanuales sobrepuestas a oscilaciones de baja frecuencia, las cuales se apreciaron en el suavizado mediante un spline de 20 años. En El Asiento (ELA), la cronología STD presentó fluctuaciones de amplitud comparable y una modulación de baja frecuencia destacada por el mismo suavizado. Estos patrones se observaron en las cronologías truncadas y en sus respectivas curvas de profundidad muestral (N) (figura 9).

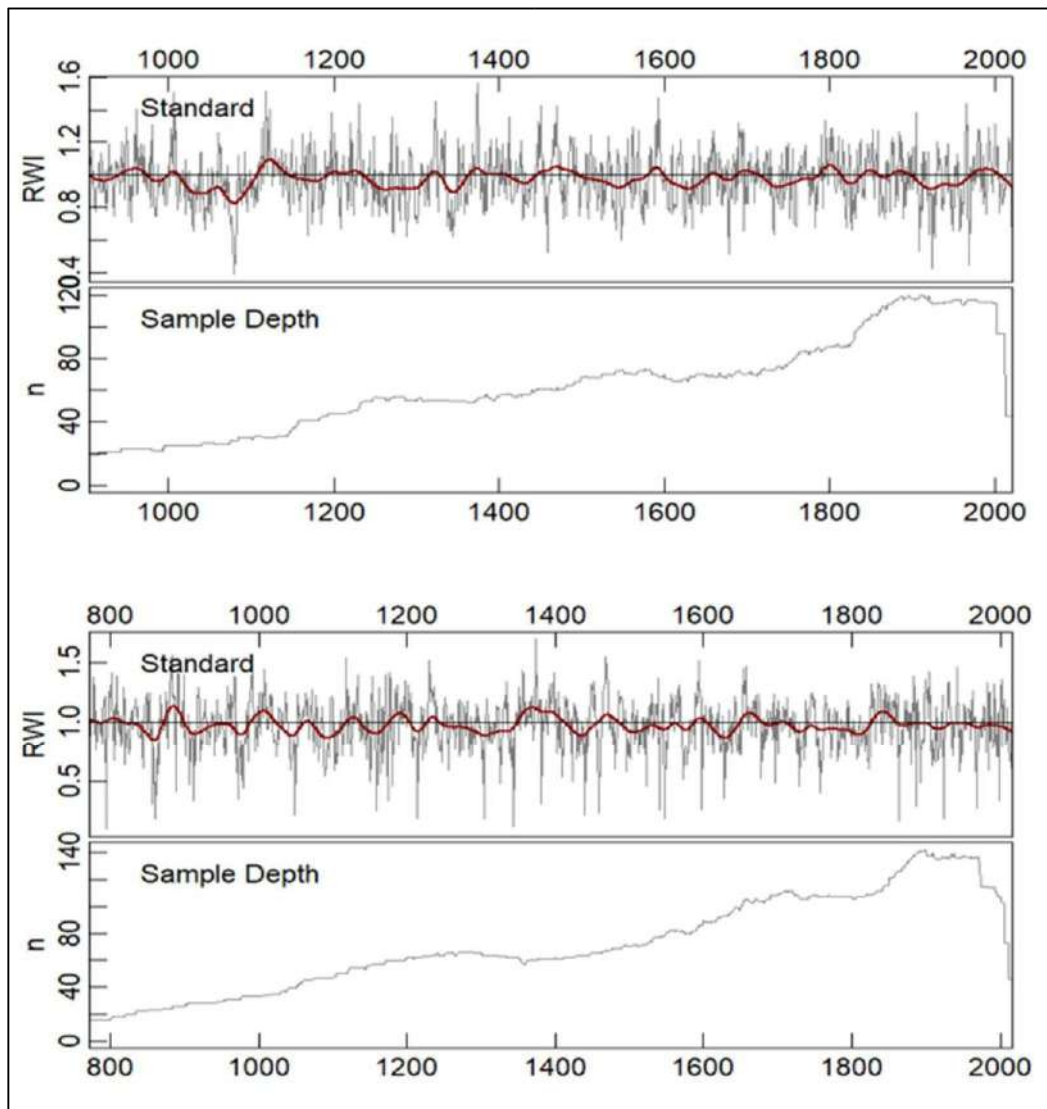


Figura 9. Cronologías estándar de *Austrocedrus chilensis* truncadas según el umbral de robustez $EPS \geq 0.85$ para los sitios El Baule (superior) y El Asiento (inferior). La línea roja corresponde a un suavizado con spline de 20 años que resalta las tendencias de baja frecuencia.

En ambas localidades, las cronologías estándar y residuales, junto con la profundidad muestral (N), fueron truncadas al período 1950–presente con el fin de asegurar una adecuada representación de la señal dendrocronológica para su posterior análisis climático. En este intervalo, ambas cronologías presentan una mayor estabilidad en la profundidad de muestra, evitando la disminución progresiva observada hacia períodos más antiguos. Estos patrones se observan en las cronologías truncadas de El Baule (ELB) y El Asiento (ELA) (Figura 10).

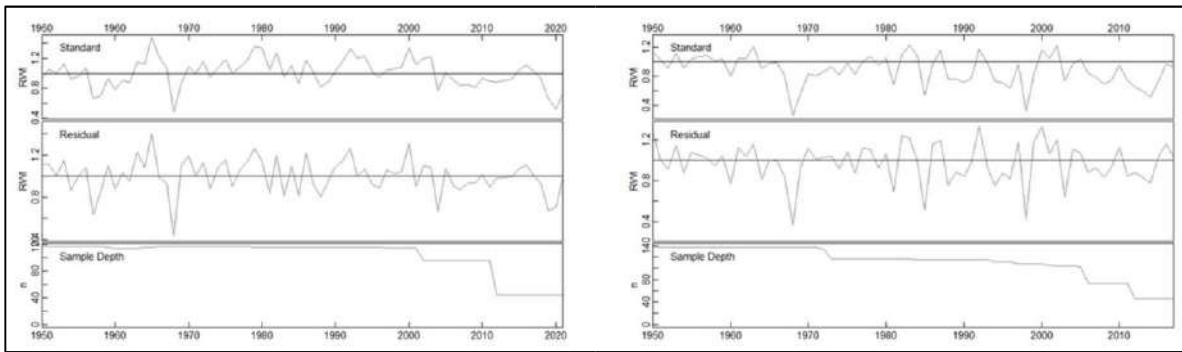


Figura 10. Cronologías estándar, residual y profundidad muestral (Sample Depth) truncadas desde 1950 para los sitios *El Baule* (izquierda) y *El Asiento* (derecha). Las cronologías fueron obtenidas mediante el paquete *dplr* en R, aplicando una tendencia exponencial negativo.

4.5. Comparación clima crecimiento al corto plazo

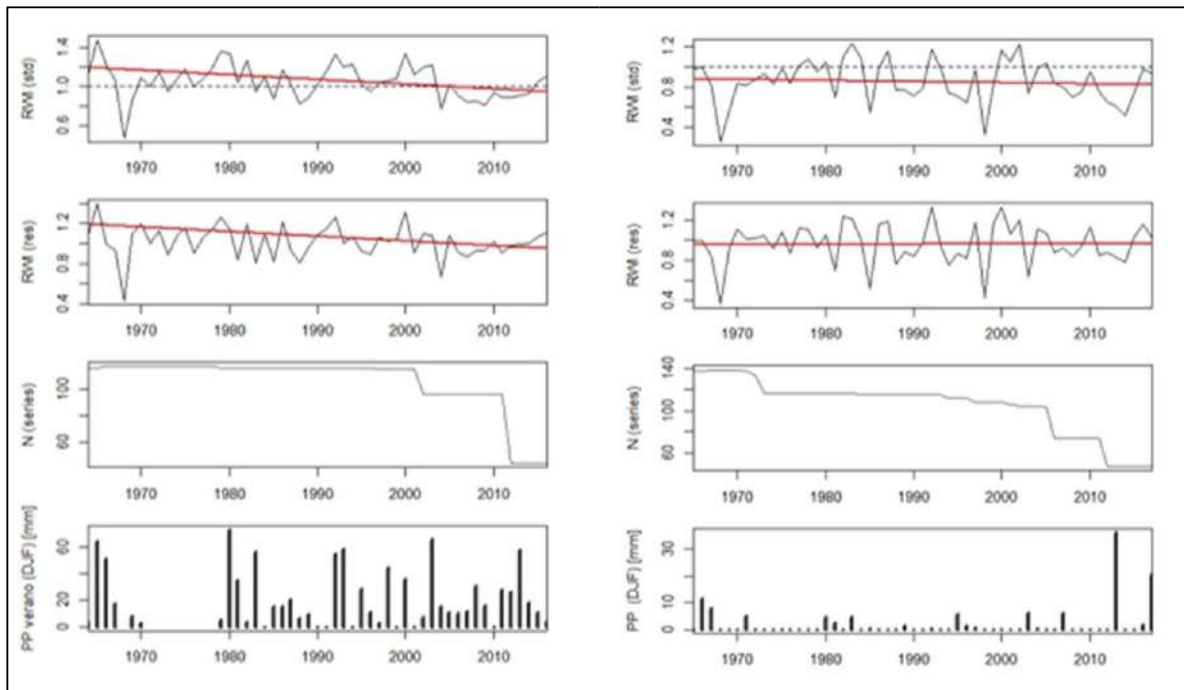


Figura 11. Cronologías estándar (std) y residual (res) de *Austrocedrus chilensis* para los sitios *El Baule* (izquierda) y *El Asiento* (derecha) durante el período 1950–2017. En la parte inferior se muestra la precipitación acumulada del verano (diciembre–febrero) correspondiente al mismo intervalo temporal.

Fuente: Elaboración con datos DGA.

En el periodo posterior a 1950, las cronologías truncadas mostraron diferencias claras entre cordilleras (figura 11). En ELB (Andes), las series STD y RES presentaron una variabilidad interanual relativamente amplia, con anomalías de crecimiento positivas y negativas distribuidas a lo largo del registro reciente. La profundidad muestral (N) se mantuvo alta durante gran parte del siglo XX, con una disminución perceptible hacia las dos últimas décadas.

La precipitación estival en ELB exhibió valores que oscilaron entre veranos de baja precipitación (≈ 0 –10 mm) y otros con eventos más húmedos que superaron los 20–40 mm. Este rango fue consistente con la climatología estival andina, donde la ocurrencia de episodios convectivos es relativamente frecuente. En algunos años se apreció una correspondencia visual entre anomalías negativas de crecimiento y veranos secos, así como entre anomalías positivas y la presencia de eventos más húmedos. No obstante, esta coincidencia no fue estricta y debe considerarse de manera descriptiva.

En ELA (Costa), las cronologías muestran una amplitud interanual más atenuada, y la precipitación estival es prácticamente nula excepto por algunos episodios aislados. En este sitio, la relación visual entre anomalías de crecimiento y PP estival es menos clara que en ELB, lo que concuerda con el carácter marcadamente seco de la zona costera durante DEF y con la menor sensibilidad del crecimiento a la precipitación estival.

En conjunto, el panel sugiere que ELB presenta una mayor sensibilidad interanual a la disponibilidad hídrica estival, mientras que ELA actúa como un sitio más estable respecto a esta señal.

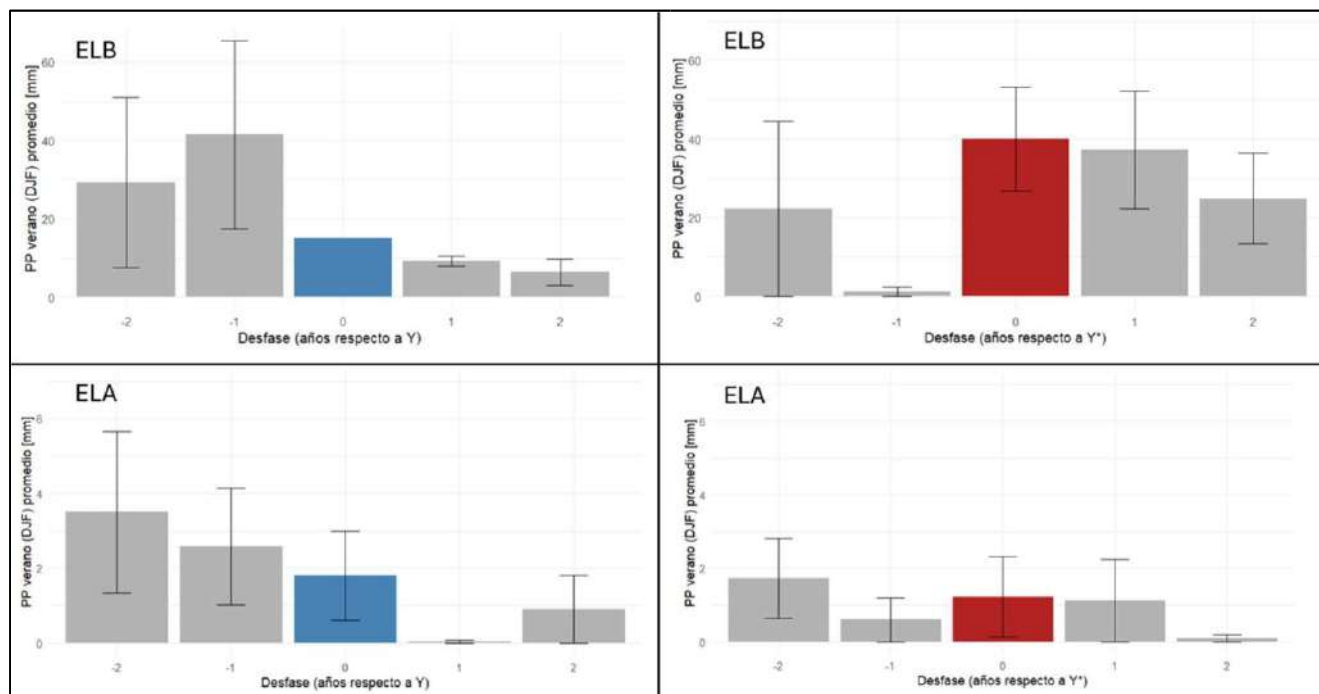


Figura 12. Precipitación promedio del verano (diciembre–febrero) asociada a los años de mayor crecimiento y menor crecimiento de *Austrocedrus chilensis* en los sitios El Baule (ELB, superior) y El Asiento (ELA, inferior). Los años considerados corresponden a los cinco mayores y cinco menores valores de crecimiento en cada sitio. Las barras azules representan los años de menor crecimiento y las rojas los años de mayor crecimiento, considerando desfases de ± 2 años respecto al año analizado.

Al analizar los cinco años de mayor crecimiento de *Austrocedrus chilensis*, ELB exhibió valores de PP-DEF en torno a 5–10 mm en lag -1, mientras que en lag 0 aumentaron hasta aproximadamente 20–35 mm y se mantuvieron dentro de un rango similar en lag +1. En consecuencia, los años de máximo crecimiento coincidieron con una mayor disponibilidad hídrica estival contemporánea y, en algunos casos, con valores comparables en el año siguiente. En ELA, las diferencias entre desfases fueron menores (rangos generalmente <10 mm) y estuvieron acompañadas de errores estándar amplios, de modo que la barra correspondiente a lag 0 no se distinguió con la misma magnitud observada en ELB.

Para los cinco años de menor crecimiento, ELB presentó valores de PP-DEF en lag 0 cercanos a 0–5 mm, mientras que en los desfases -1 y -2 se observaron valores superiores, del orden de 15–30 mm. En los desfases +1 y +2, los valores volvieron a situarse bajo los 5–10 mm. En conjunto, los mínimos

de crecimiento coincidieron con veranos secos y con registros igualmente bajos en los años inmediatamente posteriores. En ELA, la dirección general fue similar, con valores cercanos a 0 mm en lag 0, aunque con magnitudes menores y una mayor incertidumbre, lo que reforzó la atenuación de la señal interanual en la cordillera de la Costa.

Los compuestos ± 2 alrededor de los extremos (los cinco valores máximos y los cinco mínimos de la serie) evidenciaron una coherencia direccional entre crecimiento y PP-DEF en ambos sitios, con efectos más notorios en ELB. En el caso de los máximos, ELB mostró una mayor respuesta a la humedad del verano contemporáneo, mientras que ELA presentó un comportamiento más estable, amortiguando las oscilaciones interanuales (figura 12).

4.5.1. Comparación clima–crecimiento largo plazo (Costa vs. Andes)

Las cronologías de *Austrocedrus chilensis* mostraron que el contraste Costa–Andes se expresó principalmente en la amplitud de la variabilidad interanual y en las diferencias en la modulación de baja frecuencia observada en ambos sitios (figura 13). En la cordillera de los Andes (ELB), la serie residual presentó oscilaciones interanuales más amplias, con años en que el crecimiento fue mayor al promedio (anomalías positivas) y otros en que fue menor (anomalías negativas), reflejando una mayor sensibilidad a la disponibilidad hídrica estival. La cronología estándar (STD) exhibió variaciones multianuales perceptibles, coherentes con fluctuaciones decadales documentadas para la temperatura y la precipitación en Chile central (Garreaud et al. 2009). En la en la cordillera de la costa (ELA), tanto la STD como la RES presentaron una amplitud menor, consistente con un régimen mediterráneo en el cual la precipitación estival es escasa y los pulsos húmedos son poco frecuentes.

La comparación visual entre crecimiento y PP-DEF mostró asociaciones puntuales en ELB veranos con baja precipitación ($\approx 0\text{--}5$ mm) coincidieron en algunos casos con años de menor crecimiento, mientras que eventos estivales más húmedos ($\approx 20\text{--}40$ mm) se observaron junto a años de mayor crecimiento. No obstante, esta correspondencia fue parcial y debe considerarse de manera descriptiva. En ELA, las diferencias entre desfases fueron menores (<10 mm en la mayoría de los casos) y estuvieron

asociadas a una mayor incertidumbre, lo que reforzó la presencia de una señal interanual más amortiguada y una menor sensibilidad del crecimiento frente a la precipitación estival.

A escala secular ($\approx 100\text{--}500$ años), la diferencia ELB–ELA en la componente interanual promedió valores cercanos a cero, sin un predominio sostenido de un sitio sobre el otro. En baja frecuencia, se observaron diferencias leves concentradas en el periodo posterior a 1950, coincidente con la disponibilidad de registros instrumentales y con las tendencias hidroclimáticas recientes asociadas al calentamiento observado y al déficit pluviométrico persistente de las últimas décadas en Chile central (Garreaud et al. 2009, Bozkurt et al. 2016). En conjunto, estos resultados mostraron que ELB actuó como un sitio con mayor sensibilidad interanual a la disponibilidad hídrica estival, mientras que ELA presentó una variabilidad más atenuada, coherente con un clima mediterráneo costero donde la señal estival es débil y la modulación del crecimiento se manifestó principalmente en escalas multianuales y decadales.

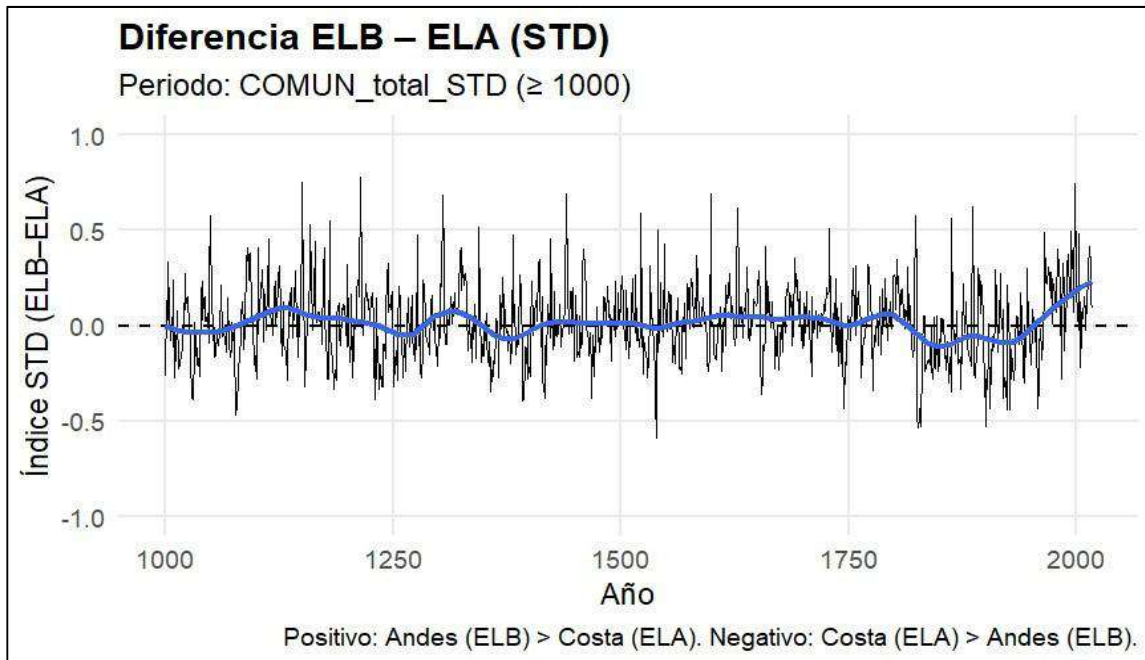


Figura 13. Diferencia entre las cronologías estándar (STD) de *Austrocedrus chilensis* de El Baule (ELB, Andes) y El Asiento (ELA, Costa) para el período común desde el año 1000 en adelante. La serie corresponde a la resta ELB–ELA, donde valores positivos indican un crecimiento relativamente mayor en los Andes y valores negativos un crecimiento relativamente mayor en la Costa. La línea azul muestra un suavizado con spline de 20 años.

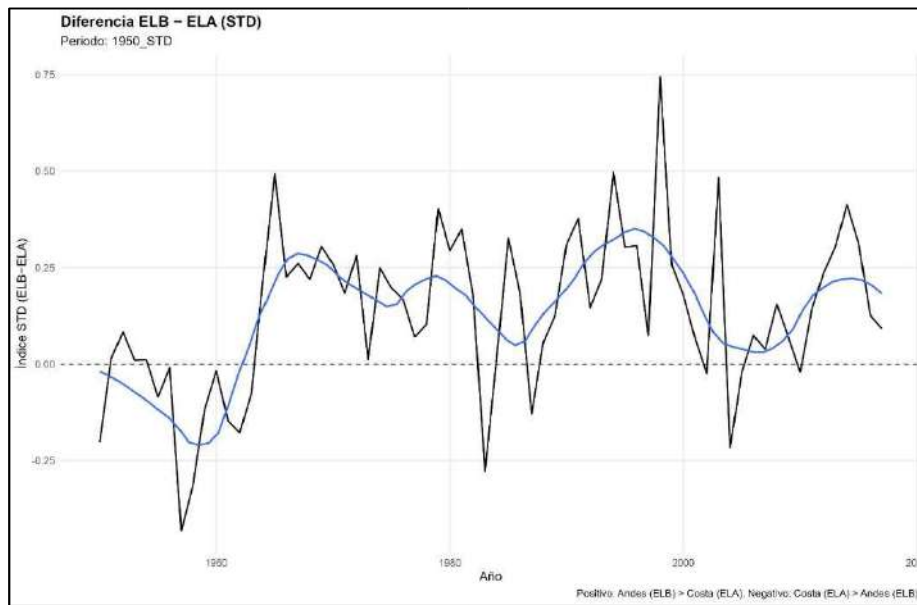


Figura 14. Diferencia entre las cronologías estándar (STD) de *Austrocedrus chilensis* de El Baule (ELB, Andes) y El Asiento (ELA, Costa) para el período 1950–2017. La serie corresponde a la resta ELB–ELA, donde valores positivos indican un crecimiento relativamente mayor en los Andes y valores negativos un crecimiento relativamente mayor en la Costa. La línea azul representa un suavizado con spline de 20 años.

La diferencia entre cronologías (ELB–ELA) sintetizó el contraste Costa–Andes durante el periodo 1950–presente (figura 14). La serie diferencial mostró valores en torno a cero, pero con fases positivas en ciertos intervalos, particularmente a fines de los años 60, mediados de los 90 y después de 2010, indicando periodos en que el crecimiento relativo fue mayor en ELB que en ELA. También se observaron segmentos cercanos a cero que reflejaron periodos de comportamiento similar entre ambos sitios.

En conjunto, esta serie resumió tres elementos descritos previamente en los Resultados: (i) la mayor amplitud interanual observada en ELB, (ii) la presencia de variaciones multianuales que moduló el nivel medio de las cronologías en ambas localidades, y (iii) la menor amplitud relativa registrada en ELA. Estos patrones completan la caracterización cuantitativa del contraste Costa–Andes obtenida a partir de las cronologías.

5. DISCUSIÓN

Los resultados climáticos y dendrocronológicos muestran diferencias consistentes entre las poblaciones de *Austrocedrus chilensis* de la cordillera de los Andes (ELB) y de la cordillera de la Costa (ELA), evidenciando una sensibilidad contrastada frente a la disponibilidad hídrica estival. Estas diferencias se expresan tanto en la amplitud de las cronologías estándar y residual como en la respuesta frente a eventos extremos, lo que refleja condiciones ambientales que divergen de manera sistemática entre ambos sistemas montañosos.

5.1. Sensibilidad diferencial entre cordilleras

En ELB, la cronología residual (RES) muestra fluctuaciones interanuales de mayor amplitud, un patrón coherente con la sensibilidad de *Austrocedrus chilensis* a la disponibilidad hídrica estival documentada en estudios previos (Le Quesne et al. 2006, Christie et al. 2009). En este sitio, los años con veranos de baja precipitación ($\approx 0\text{--}5$ mm) tienden a coincidir con años de menor crecimiento, mientras que veranos con aportes hídricos mayores ($\approx 20\text{--}40$ mm) se asocian ocasionalmente a crecimientos superiores al promedio. Aunque la correspondencia no es estricta, esta relación entre disponibilidad hídrica estival y crecimiento radial ha sido reportada previamente para poblaciones andinas de *A. chilensis*, donde la ocurrencia de eventos convectivos estivales contribuye a sostener la actividad cambial en años particularmente secos (Roig 1991, Szeicz et al. 2000).

En contraste, la respuesta en ELA presenta una amplitud menor. Aunque la serie PP-DEF muestra numerosos veranos con valores próximos a cero entre 1965 y 2015, las anomalías en la cronología residual (RES) exhiben variaciones interanuales más atenuadas, mientras que la cronología estándar (STD) muestra oscilaciones multianuales menos pronunciadas. Solo episodios excepcionalmente húmedos, como los registrados en 1966, 2013 y 2017, generan incrementos notorios en el crecimiento, aunque de menor magnitud relativa que en ELB. Este comportamiento sugiere que, en la cordillera de la Costa, el crecimiento radial está menos acoplado a la señal estival y responde preferentemente a condiciones de mayor escala temporal, tal como ha sido descrito para otras poblaciones costeras de coníferas en climas mediterráneos del Cono Sur (Villalba et al. 2003).

5.2. Mecanismos climáticos que explican el contraste ELB–ELA

La interpretación de estos patrones es coherente con la climatología de Chile central. En los Andes, especialmente hacia su vertiente oriental, la actividad convectiva estival aporta una fracción relevante de la precipitación entre diciembre y febrero, con eventos capaces de concentrar la mayor parte del total mensual en pocos días (Garreaud y Rutllant 1997, Barrett y Garreaud 2012). Esta precipitación convectiva presenta una elevada variabilidad espacio–temporal y genera veranos aislados con aportes hídricos significativos, lo que concuerda con estudios que documentan gradientes marcados de intensidad convectiva en los Andes subtropicales a partir de observaciones satelitales del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (Nesbitt y Zipser 2003). La presencia de estos pulsos estivales intermitentes puede influir directamente en el crecimiento radial de *Austrocedrus chilensis* en ambientes andinos, tal como ha sido señalado para otras coníferas en zonas áridas y semiáridas de Sudamérica (Roig 1991, Szeicz et al. 2000).

En contraste, la cordillera de la Costa se mantiene mayormente bajo condiciones de subsidencia asociadas al Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS), lo que suprime la convección profunda y limita la precipitación estival a eventos esporádicos de baja intensidad (Falvey y Garreaud 2009, Bozkurt et al. 2016). Esta configuración atmosférica, junto con suelos más someros y de menor capacidad de retención hídrica, reduce la contribución efectiva de la precipitación estival reciente al crecimiento radial. En este contexto, el comportamiento de *A. chilensis* en ELA muestra variaciones interanuales de menor amplitud que en ELB, lo que sugiere una mayor influencia de escalas estacionales y multianuales más que de la variabilidad estival de corto plazo, en concordancia con lo documentado para poblaciones costeras en climas mediterráneos del Cono Sur (Villalba et al. 2003).

5.3. Eventos extremos y coherencia entre sitios

Los eventos extremos refuerzan las diferencias entre cordilleras. En ELB, los años con veranos secos muestran descensos notorios en las cronologías RES y STD, mientras que años con mayor precipitación estival se asocian en varias ocasiones a incrementos del crecimiento, un patrón coherente con la sensibilidad de *Austrocedrus chilensis* a la disponibilidad hídrica documentada para poblaciones andinas (Le Quesne et al. 2006). En ELA, en cambio, múltiples veranos con PP-DEF cercana a cero no

generan disminuciones equivalentes en el crecimiento, y las oscilaciones en la cronología RES presentan una amplitud menor. Asimismo, los eventos húmedos afectan a ambos sitios, pero con respuestas de mayor magnitud y persistencia en ELB que en ELA.

La coincidencia temporal en la dirección de los cambios durante años extremos indica que ambas poblaciones responden a forzantes climáticos regionales comunes, aunque la magnitud de la respuesta difiere según las condiciones locales. En particular, ELB presenta una sensibilidad interanual más marcada frente a la disponibilidad hídrica estival, mientras que ELA muestra variaciones más acotadas. Esto es consistente con el papel de los gradientes de humedad y de la exposición fisiográfica en modular la señal climática expresada por las cronologías regionales (Villalba et al. 2003).

5.4. Implicancias para la interpretación climática y ecológica

El contraste observado entre cordilleras se entiende mejor al considerar el marco fisiográfico y climático de Chile central. En ELB, las cronologías muestran una mayor amplitud interanual y respuestas más marcadas durante años extremos, lo que es coherente con ambientes andinos donde la estacionalidad mediterránea, la mayor exposición y la limitada retención hídrica del suelo pueden amplificar la respuesta del crecimiento frente a variaciones en el balance hídrico anual (Villalba et al. 2003, Le Quesne et al. 2006). En este contexto, las diferencias entre veranos secos y veranos con aportes moderados de precipitación pueden contribuir a generar fluctuaciones interanuales más evidentes, aun cuando la mayor fracción de la precipitación anual ocurre en invierno.

En contraste, ELA muestra variaciones más acotadas, consistentes con las condiciones propias de la vertiente interna de la cordillera de la Costa, caracterizada por una menor influencia oceánica directa, una mayor continentalidad relativa y una amplitud térmica moderada. En este sector, los suelos someros y la escasa precipitación estival se combinan con una alta exposición al secamiento atmosférico, pero sin los pulsos convectivos frecuentes que afectan al sector andino. Estas características favorecen un crecimiento menos variable de un año a otro, en concordancia con lo descrito para poblaciones de *Austrocedrus chilensis* ubicadas en ambientes donde la estacionalidad mediterránea es menos extrema y donde la señal climática se expresa principalmente en escalas plurianuales (Villalba et al. 2003).

La marcada reacción de la población andina frente a años extremadamente secos concuerda con estudios que documentan la vulnerabilidad creciente de *A. chilensis* en zonas de mayor aridez relativa, especialmente bajo las tendencias de calentamiento y déficit pluviométrico observadas durante las últimas décadas en Chile central (Le Quesne et al. 2014, Rozas et al. 2016). En este escenario, las poblaciones altoandinas podrían enfrentar limitaciones más severas en el futuro, mientras que las poblaciones costeras expresan una variabilidad menor, acorde con condiciones ambientales relativamente más amortiguadas.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió comparar los patrones de crecimiento radial de *Austrocedrus chilensis* en dos contextos fisiográficos contrastantes de Chile central: la cordillera de los Andes (El Baule) y la cordillera de la Costa (El Asiento). Mediante la construcción de cronologías estandarizadas y truncadas según la robustez estadística ($EPS \geq 0,85$), fue posible analizar las variaciones interanuales y de baja frecuencia en ambos sitios, asegurando la comparabilidad temporal y la representatividad de la señal común de crecimiento. Este enfoque permitió evaluar la respuesta climática de la especie frente a las condiciones térmicas y pluviométricas del periodo reciente (1950–presente), en el contexto de la variabilidad climática de largo plazo documentada para Chile central.

Los resultados evidencian que *Austrocedrus chilensis* presenta una marcada sensibilidad al régimen hídrico estival en el sector andino, donde las cronologías exhiben una mayor amplitud interanual y fluctuaciones que coinciden en varios casos con veranos relativamente húmedos. En contraste, el sitio de la cordillera de la costa (ELA) muestra una señal más atenuada y estable, coherente con un ambiente de menor variabilidad climática y con una mayor amortiguación térmica. Este contraste refleja el gradiente climático transversal característico de la zona central de Chile, donde la convección estival y la disponibilidad hídrica se intensifican hacia el oriente, mientras las laderas costeras permanecen bajo la influencia persistente del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur. En conjunto, estos resultados indican que la población andina responde con mayor sensibilidad a fluctuaciones estivales de corto plazo, mientras que la población costera presenta variaciones de menor amplitud, más asociadas a condiciones estacionales integradas.

Las cronologías obtenidas fueron consistentes dentro de cada localidad y reflejaron patrones acordes con la literatura previa, lo que confirma que *Austrocedrus chilensis* constituye un indicador robusto de las condiciones ambientales en ambientes contrastantes de Chile central. El comportamiento diferencial entre sitios subraya la importancia de considerar la topografía, la altitud y la exposición fisiográfica como moduladores claves de la señal dendroclimática. Este conocimiento contribuye a fortalecer la base de datos dendrocronológica para Chile central y aporta evidencia relevante para comprender la respuesta ecológica de las coníferas nativas ante gradientes ambientales marcados.

Finalmente, estos resultados adquieren especial relevancia frente a las tendencias hidroclimáticas recientes de la zona central de Chile, caracterizadas por un aumento de la temperatura media y una disminución sostenida de las precipitaciones (IPCC 2021, Garreaud et al. 2009). Por su longevidad, capacidad de registrar condiciones ambientales pasadas y valor patrimonial, *A. chilensis* se presenta como una herramienta ecológica clave para el monitoreo de la aridez y para la planificación de estrategias de conservación orientadas a la resiliencia de los bosques relictos en ambas cordilleras (Lara et al. 2013, Bannister 2015). Futuras investigaciones que integren análisis isotópicos, aproximaciones climáticas de mayor resolución o reconstrucciones multicapa podrán profundizar en la comprensión de las relaciones entre clima, crecimiento y adaptación en *Austrocedrus chilensis*, fortaleciendo el papel de la dendrocronología en la gestión y conservación de los ecosistemas de montaña de Chile central (Villalba et al. 2003).

7. REFERENCIAS

- Andeshandbook (CL). 2023. Serranía del Ciprés – El Asiento. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en <https://www.andeshandbook.org>.
- Arias PA, Garreaud R, Poveda G, Espinoza JC, Molina-Carpio J, Masiokas M, Viale M, Scaff L, van Oevelen PJ. 2021. Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate variability and subcontinental patterns. *Frontiers in Earth Science* 8:505467
- Bannister J. 2015. Recuperar bosques no es solo plantar árboles: lecciones aprendidas luego de siete años restaurando bosques de *Pilgerodendron uviferum* en Chiloé. *Anales del Instituto de la Patagonia* 43(1):5–16.
- Barrett BS, Garreaud RD. 2012. Moisture transport and the precipitation response to tropical–extratropical interactions in the southern Andes. *Journal of Climate* 25(5):1636–1653.
- Boisier JP. 2023. CR2MET v2.5: high-resolution precipitation and temperature dataset for continental Chile (1960–2021). Zenodo. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>
- Bozkurt D, Rondanelli R, Garreaud RD, Arriagada A. 2016. Impact of anthropogenic climate change on the South Pacific Anticyclone. *Climate Dynamics* 49(5–6):1–19.
- Bunn AG. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2):115–124.
- Christie DA, Boninsegna JA, Cleaveland MK, Lara A, Le Quesne C, Morales MS, Villalba R. 2009. Aridity changes in the Temperate–Mediterranean transition of southern South America. In Berger A ed. *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth*. Dordrecht, Netherlands. Springer. p. 193–209.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 2016. Reserva Nacional Río Los Cipreses. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en https://www.conaf.cl/parque_nacionales/reserva-nacional-rio-de-los-cipreses/

- Cook ER, Holmes RL. 1984. User manual for program ARSTAN. Tucson, USA. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.
- Cook ER, Kairiukstis LA. 1990. Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences. Dordrecht, Netherlands. Kluwer Academic Publishers.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (CL). 2023. Reporte anual de la evolución del clima en Chile. Santiago, Chile. Dirección General de Aeronáutica Civil.
- Falvey M, Garreaud RD. 2009. Regional cooling in a warming world: recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114(D4):1–16.
- Finot VL, Moreira-Muñoz L, Sepúlveda A, Castro C. 2018. Flora vascular del Santuario de la Naturaleza Serranía El Ciprés. *Gayana Botánica* 75(1):307–321.
- Garreaud R, Rutllant J. 1997. Precipitación estival en los Andes de Chile central: aspectos climatológicos. Santiago, Chile. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- Garreaud R, Vuille M, Compagnucci R, Marengo J. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281(3–4):180–195.
- Hoffmann A. 2005. Flora silvestre de Chile: Zona Araucana. Santiago, Chile. Fundación Claudio Gay.
- Holmes RL. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tucson, USA. Tree-Ring Society.
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Jara P, Charrier R. 2014. Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32° y 32°30'S: implicancias estructurales y paleogeográficas. *Andean Geology* 41:174–209.
- Lara A, Bannister J, Donoso C, Rovere A, Soto D, Escobar D, Premoli A. 2013. *Pilgerodendron uviferum* (D. Don) Florin. In Donoso C ed. *Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: Autoecología*. Valdivia, Chile. Marisa Cúneo Ediciones. p. 82–92.

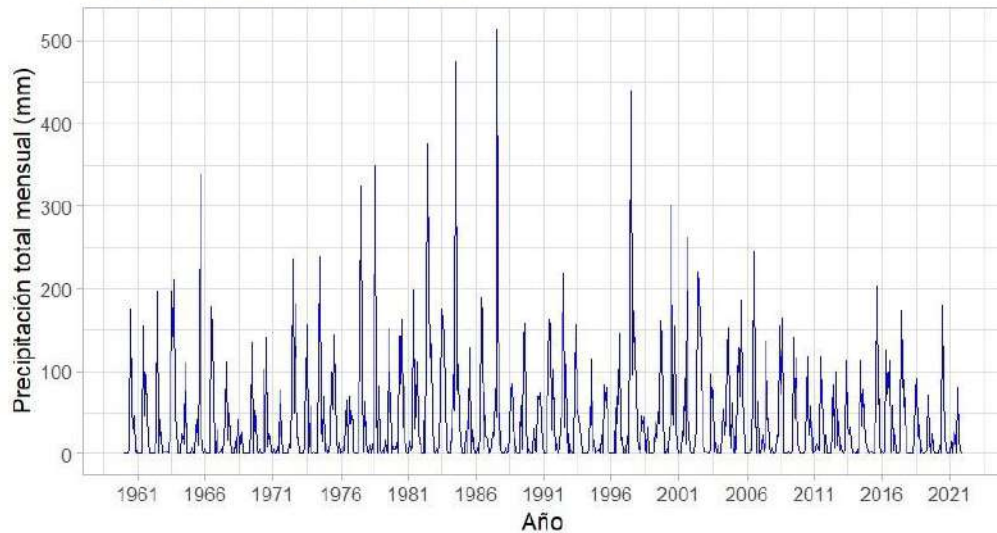
- Le Quesne C, Rojas M, Christie D. 2014. Anillos de crecimiento de *Austrocedrus chilensis*: un archivo natural del cambio climático. *Chagual* 12:31–35.
- Le Quesne C, Stahle DW, Cleaveland MK, Therrell MD, Aravena JC, Barichivich J. 2006. Ancient *Austrocedrus chilensis* tree-ring chronologies used to reconstruct central Chile precipitation variability from AD 1200 to 2000. *Journal of Climate* 19(24):5731–5744.
- Ministerio de Educación (CL). 2006. Decreto Exento N.º 698: Declara Santuario de la Naturaleza Serranía El Ciprés. Valparaíso, Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente (CL). 2023. Santuario de la Naturaleza Serranía El Ciprés. Consultado 10 jul. 2023. Disponible en <https://simbio.mma.gob.cl>.
- Nesbitt SW, Zipser EJ. 2003. The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to TRMM. *Journal of Climate* 16(10):1456–1475.
- R Core Team. 2023. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing.
- Roig FA. 1991. Dendrocronología y dendroclimatología del bosque de *Pilgerodendron uviferum* en su área norte de dispersión. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 27:217–234.
- Rozas V, Le Quesne C, Rojas-Badilla M. 2016. Factores climáticos que controlan el crecimiento radial y la formación de fluctuaciones de densidad en la madera de *Austrocedrus chilensis* en Valdivia, Chile. *Bosque* 37(3):529–540.
- RStudio Team. 2022. RStudio: integrated development environment for R. Boston, USA. RStudio PBC.
- Schulman E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. Tucson, USA. University of Arizona Press.
- Szeicz JM. 1997. Growth trends and climatic sensitivity of trees in the North Patagonian rain forest of Chile. *Canadian Journal of Forest Research* 27(7):1005–1013.
- Szeicz JM, Lara A, Díaz S, Aravena JC. 2000. Dendrochronological studies of *Pilgerodendron uviferum* in southwestern South America. In Roig FA ed. *Dendrocronología en América Latina*. Mendoza, Argentina. EDIUNC. p. 207–231.

- Villalba R, Lara A, Boninsegna JA, Masiokas M, Delgado S, Aravena JC, Ripalta A. 2003. Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in context of the past 400 years. *Climate Change* 59(1–2):177–232.
- Wigley TML, Briffa KR, Jones PD. 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.

8. ANEXOS

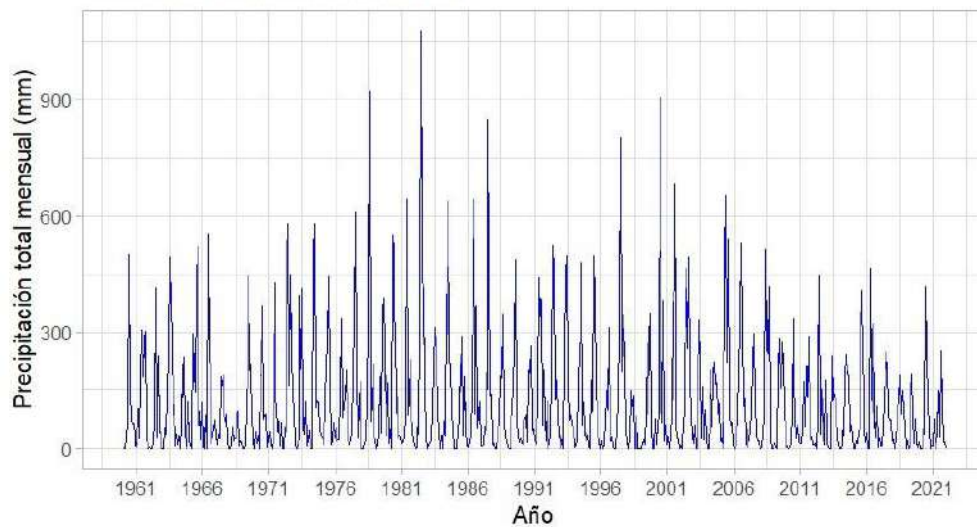
Precipitación mensual acumulada - El Asiento (1960–2021)

Datos extraídos desde CR2MET v2.5

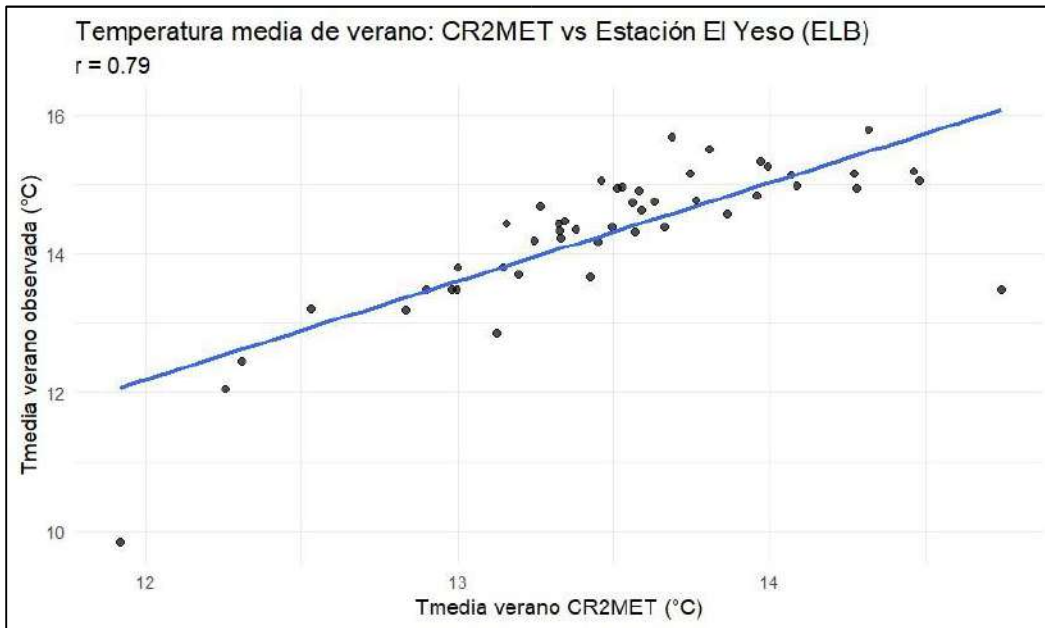


Precipitación mensual acumulada - El Baule (1960–2021)

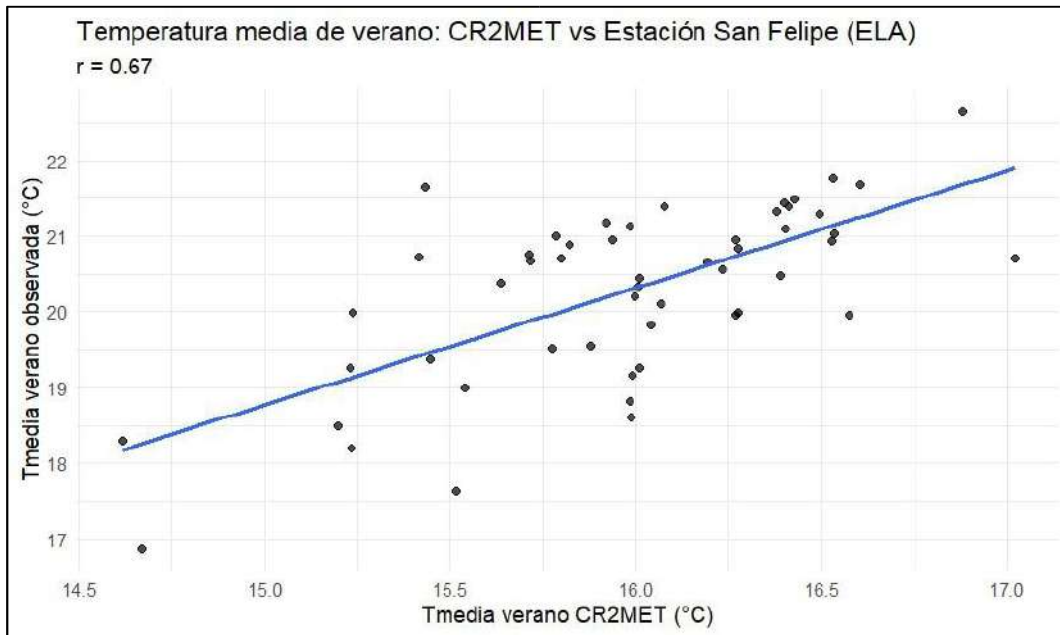
Datos extraídos desde CR2MET v2.5



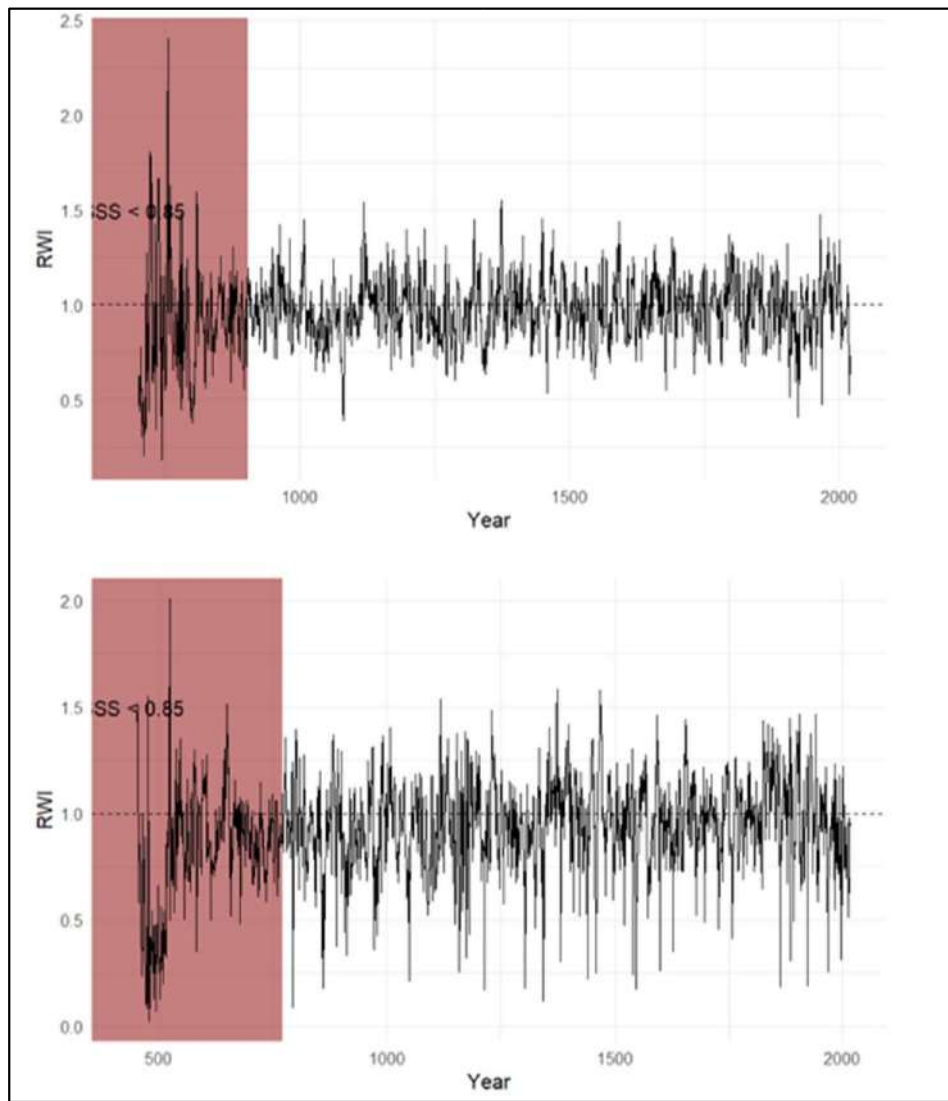
Anexo 1. Precipitación mensual acumulada para los sitios El Asiento (superior) y El Baule (inferior) durante el período 1960–2021, obtenida desde el producto climático grillado CR2MET v2.5. Fuente: Elaboración propia.



Anexo 2. Relación entre la temperatura media estival observada en la estación El Yeso y la derivada de CR2MET para el sitio ELB. La correlación de Pearson fue $r = 0,79$.



Anexo 3. Relación entre la temperatura media estival observada en la estación San Felipe y la derivada de CR2MET para el sitio ELA. La correlación fue $r = 0,67$.



Anexo 4. Secciones iniciales de las cronologías de *Austrocedrus chilensis* para los sitios El Asiento (superior) y El Baule (inferior), mostrando el período con $SS < 0.85$ (área sombreada) previo al truncado por señal común.