



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERIA EN CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

**ESTUDIO DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO DE *VACHELLIA CAVEN*
(MOLINA) SEIGLER & EBINGER COMO INDICADORES DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CUENCA DE PETORCA, REGIÓN DE VALPARAÍSO**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniera en Conservación de
Recursos Naturales

POR: Paulina Andrea Sáez Muñoz

Profesor Guía: Paula Meli
Alejandro Venegas

Marzo, 2024

Concepción, Chile

© 2024, Paulina Andrea Sáez Muñoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

ESTUDIO DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO DE *VACHELLIA CAVEN*
(MOLINA) SEIGLER & EBINGER COMO INDICADORES DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CUENCA DE PETORCA, REGIÓN DE VALPARAÍSO



Profesora Guía

Paula Meli

Profesora Asistente

Bióloga, Dra.



Profesor Guía

Alejandro Venegas

Colaborador Externo

Ingeniero forestal, Dr.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi familia por su apoyo moral en este proceso universitario, a las amigas que me entregó esta etapa, y también a mis profesores Paula Meli y Alejandro Venegas por sus conocimientos entregados y palabras de aliento.

A los integrantes del laboratorio Dendroecología y Adaptación al Cambio Global de la Universidad de O'Higgins por estar dispuestos a ayudar ante cualquier duda, y al proyecto FONDECYT 1221701 etapa 2023, cuyo financiamiento contribuyó al desarrollo de esta investigación.

Finalmente, quiero expresar mi profundo agradecimiento a todos los docentes de la Universidad de Concepción que dedican su tiempo y esfuerzo a impartir esta hermosa carrera. En gran medida, gracias a las enseñanzas impartidas por ellos, me encuentro ad portas de convertirme en una profesional en el área de la conservación.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA	7
2.1 Descripción del área de estudio	7
2.2 Especie de estudio	9
2.3 Diseño de estudio	11
2.3.1 Muestreo	11
2.3.2 Anatomía de la especie	11
2.3.3 Desarrollo de la cronología	12
2.3.4 Análisis de la variabilidad climática	16
2.3.5 Correlación entre cronología y variables climáticas	18
III. RESULTADOS	20
3.1 Anatomía de los anillos de crecimiento de <i>Vachellia caven</i>	20
3.2 Características de los árboles estudiados	21
3.3 Construcción de la cronología de anillo de crecimiento	22
3.4 Correlación entre la cronología de la especie y variables climáticas locales, regionales y globales	24
3.4.1 Sensibilidad climática con variables locales en el crecimiento radial	26
3.4.2 Sensibilidad climática con variables regionales en el crecimiento radial	30
3.4.3 Sensibilidad climática con variables globales en el crecimiento radial	31
IV. DISCUSIÓN	34
4.1 Anatomía de la madera y anillos de crecimiento de <i>V. caven</i>	34
4.2 Cronología de ancho de anillo de <i>V. caven</i> en la cuenca del río Petorca	34
4.3 Análisis dendroclimático con variables locales, regionales y globales	35
4.3.1 Variables locales	35

4.3.2	Variables regionales	37
4.3.3	Variables globales	39
V.	CONCLUSIONES	42
VI.	GLOSARIO	45
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables y/o forzantes climáticos de estudio.....	16
Tabla 2. Correlación entre los individuos de la población con la primera metodología y la segunda metodología.....	23

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de muestreo de <i>V. caven</i> en la comuna de Petorca, Región de Valparaíso, Chile.....	8
Figura 2. a) Aspecto general de la especie de estudio (<i>V. caven</i>). b) Corte transversal del tronco con clara diferenciación de albura y duramen.....	10
Figura 3. Primera metodología para desarrollar la cronología utilizando una lupa estereoscópica conectada a una Tabla Unislide VELMEX y a un contador digital (met 1).....	13
Figura 4. Segunda metodología para desarrollar la cronología utilizando el programa CooRecorder 9.8.1 (met 2).....	14
Figura 5. Sección transversal de <i>V. caven</i>	20
Figura 6. a) Segmentos de demarcación para anillos de crecimiento de <i>V. caven</i> . b) Anillos de crecimiento demarcados por la línea de parénquima terminal, con fuerte variabilidad en el ancho de ellos.....	22
Figura 7. Matriz de correlación múltiple de Pearson de las variables climáticas a) Regionales. b) Globales. c) Locales.....	25
Figura 8. Correlación de la cronología con a) la temperatura máxima desde ppE (1° mes) a fM (41° mes) b) la temperatura mínima desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).....	27
Figura 9. Correlación de la cronología con la precipitación desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).....	28
Figura 10. Correlación entre el crecimiento de <i>V. caven</i> con la precipitación del mes de julio desde el año 1980 a 2021.....	29
Figura 11. Correlación de la cronología con el déficit hídrico climático desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).....	30
Figura 12. Correlación de la cronología con el déficit de presión de vapor desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).....	31
Figura 13. Correlación de la cronología con el Modo Anular del Sur desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).....	32
Figura 14. Correlación de la cronología con el Índice Multivariado del ENOS desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).....	33

RESUMEN

En la actualidad, el análisis de la variabilidad histórica del clima en Chile involucra diversas disciplinas, y entre ellas destaca la dendrocronología, enfoque que ha centrado sus investigaciones en la reconstrucción climática y resiliencia de los bosques frente al cambio climático, centrándose principalmente en especies arbóreas del centro-sur del país. Sin embargo, la región central, dominada por formaciones xerofíticas, carece de representantes destacados para este tipo de estudios. Por este motivo, se seleccionó una población de la especie *Vachellia caven* para evaluar su potencial dendrocronológico como indicador indirecto (*proxy*) del clima en la cuenca alta del río Petorca, ubicada en la región de Valparaíso. Se seleccionó esta especie porque tiene amplia distribución en Chile central. El proceso incluyó la realización de cortes histológicos para comprender la disposición de los anillos en la madera. Además, se desarrollaron dos cronologías con diferentes metodologías, la primera utiliza una Tabla Unislide Velmex y la segunda utiliza el software Coorecorder. Esta última metodología mostró mayor correlación entre individuos para ser relacionada con variables climáticas locales (precipitación, temperatura máxima y mínima), regionales (déficit hídrico climático y déficit de presión de vapor), y globales (Modo Anular del Sur y el Índice Multivariado del Niño Oscilación del Sur). Los principales resultados muestran que el crecimiento radial de la población es sensible a la reducción de la precipitación de invierno ($r=0.51$, $p<0.05$), demostrando que *V.*

caven es una especie *proxy* de la variabilidad climática en las formaciones xerofíticas, y que si continua la persistencia de las condiciones de cambio climático, aumentaría la vulnerabilidad de sus poblaciones en esa región, poniendo en riesgo el almacenamiento de biomasa aérea de los ecosistemas xerofíticos de la cuenca alta del Río Petorca.

ABSTRACT

Currently, the analysis of historical climate variability in Chile involves various disciplines, among which dendrochronology stands out. This approach has focused its research on climate reconstruction and forest resilience to climate change, primarily focusing on tree species in the central-southern region of the country. However, the central region, dominated by xerophytic formations, lacks prominent representatives for this type of study. For this reason, a population of the *Vachellia caven* species was selected to evaluate its dendrochronological potential as an indirect indicator (*proxy*) of climate in the upper Petorca River basin, located in the Valparaíso region. The rationale behind this selection stems from the species' widespread distribution across central Chilean ecosystems. The process included the preparation of histological cuts to understand the arrangement of rings in the wood. Additionally, two chronologies were developed using different methodologies, the first utilizing a Velmex Unislide Table and the second using CooRecorder software. This latter methodology showed higher correlation among individuals to be related to local climatic variables (precipitation, maximum and minimum temperature), regional variables (climatic water deficit and vapor pressure deficit), and global variables (Southern Annular Mode and Multivariate El Niño Southern Oscillation Index). The main results show that the radial growth of the population is sensitive to winter precipitation reduction ($r=0.51$, $p<0.05$), demonstrating that *V. caven* is a proxy species for climatic

variability in xerophytic formations. If the persistence of climate change conditions continues, it would increase the vulnerability of its populations in that region, endangering the storage of aboveground biomass in xerophytic ecosystems of the upper Petorca river basin.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, grandes cambios están ocurriendo en los procesos de la biosfera, observándose un conjunto de alteraciones en la composición y funcionamiento de los ecosistemas debido a presiones antrópicas y climáticas, lo cual nos lleva a concluir que presenciamos un cambio global (Sage, 2020). Específicamente, se están observando cambios en los patrones del clima, que han causado un aumento de periodos prolongados de escases hídrica a nivel planetario (Collins et al., 2013), desencadenando repercusiones sobre la sociedad, los sistemas productivos y los ecosistemas nativos (Sarricolea & Meseguer-Ruiz, 2015; Valencia, 2019). Particularmente, los ecosistemas ubicados en regiones semiáridas y mediterráneas se encuentran entre los más vulnerables frente al cambio climático (Seager et al., 2019), destacando la región central de Chile (Garreaud et al., 2017). Por lo tanto, las formaciones xerofíticas de la región central del país toman particular interés para investigar su fragilidad y grado de afectación frente a este escenario.

En Chile, la zona mediterránea, ubicada entre 32°45' y los 37°30' Sur, desde finales del siglo XIX y hasta 1950/1980 presentaba un régimen de precipitaciones relativamente estable, pero a partir de esa fecha, y coincidiendo con el incremento del calentamiento global, se observó un aumento en las condiciones de sequía (Ovejero & Minetti, 2016). Especialmente, desde el año 2010 se

registra un período que ha sido denominado “megasequía”, en el cual se observa un déficit de precipitaciones en promedio de 30%, destacando como años en extremos secos el 2019 y 2021, con valores cercanos al 80% de déficit (Alvarez–Garretón et al., 2021). Además, se proyectan alzas de temperaturas de 2 a 4°C (Bravo et al., 2014; Garreaud et al., 2017), y se ha registrado un aumento de las olas de calor en la última década (González–Reyes, 2023) que, en conjunto con la disminución de la precipitación, están afectando la disponibilidad de humedad en el suelo. Esta zona atraviesa una sequía sin precedentes, y la frecuencia e intensificación de los sucesos no da lugar a una adaptación rápida del ecosistema desencadenando efectos negativos en el crecimiento de bosques, la biodiversidad, la sociedad y las actividades productivas de la región (Aldunce et al., 2017; Zambrano et al., 2018; Arroyo et al., 2020; Barría et al., 2021; Miranda et al., 2023; Venegas-González et al., 2023).

Los ecosistemas presentes en la zona mediterránea de Chile central destacan por su alta diversidad y gran endemismo de especies de flora (Luebert et al., 2022). Estos ecosistemas se caracterizan por presentar dos estaciones dicotómicas (Jaksic, 2001), en la estación de invierno se registra frío y lluvia con variables patrones interanuales de precipitación, y una estación de verano cálida y seca (Aceituno, 1990). La vegetación está compuesta principalmente por matorral y bosque esclerófilo achaparrado; en particular, el matorral se compone principalmente por arbustos espinosos xerofíticos con hojas esclerófilas (Arroyo

et al., 2000). Sin embargo, históricamente han sido intensamente presionados por la agricultura extensiva y el crecimiento de centros poblados (Forzieri et al., 2022), por lo que la disponibilidad de agua es un factor crítico para su dinámica natural (Sarricolea & Meseguer-Ruiz, 2015).

Los índices de sequía anuales suelen estar correlacionados en forma significativa con los cambios interanuales de temperatura global en las zonas de Chile central (Ovejero & Minetti, 2016), por lo que existe una necesidad de conocer los impactos del cambio climático en los recursos hídricos con variables climatológicas que afectan en el ecosistema y con ello el crecimiento de especies leñosas, todo dentro de un contexto cambiante del clima y la necesidad de incorporar la intervención antrópica. Es por esto que, surge la necesidad de estudiar la respuesta de los ecosistemas xerofíticos frente a estas condiciones climatológicas adversas en regiones altamente afectadas por sequías, como es el caso de la cuenca alta del río Petorca en la región de Valparaíso (Muñoz et al., 2020) que ha sido declarado zona de catástrofe por la sequía desde el año 2012 (Decreto 284, Ministerio del Interior y Seguridad Pública [MinInterior], 2022). Además, esta sequía prolongada ha impactado la productividad agrícola y en el estilo de vida de las personas que habitan en el sector rural de la comuna (Panez–Pinto et al., 2018).

La dendrocronología, que deriva del griego dendron – árbol, crono – tiempo y logo – conocimiento, es la disciplina retrospectiva más usada para estudiar la relación entre el cambio climático y los árboles (Lara et al., 1994, 2000). Dado que, la datación de los anillos de crecimiento anuales de especies leñosas se relaciona con diferentes variables que han influido en su crecimiento (Gutiérrez, 2009), ha sido ampliamente usada para conocer perturbaciones a escala anual, de décadas, o incluso siglos, permitiendo recuperar condiciones climáticas con dataciones más antiguas que las descritas en estaciones meteorológicas por el humano (Speer, 2010), y a entender como es la respuesta de los bosques frente al cambio climático actual (Guibal & Guiot, 2021). Los estudios de dendrocronología se han centrado principalmente en los ecosistemas ubicados en el límite altitudinal arbóreo en el hemisferio Norte y Sur, reflejando una fuerte eficacia en registros climáticos del pasado (Boninsegna et al., 2009). Sin embargo, en el Chile mediterráneo, su empleo ha sido direccionado preferentemente a bosques caducifolios (Venegas–González et al., 2018) y recientemente al bosque esclerófilo (Venegas–González et al., 2023), por lo que aún está el desafío de aplicar esta disciplina en ecosistemas xerofíticos.

Estas comunidades vegetales se definen como “formaciones xerofíticas” por la Ley 20.283 (Ley sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal) y es constituida por especies autóctonas, preferentemente arbustivas o suculentas, de áreas con condiciones áridas o semiáridas de Chile (Ministerio de Vivienda y

Urbanismo [Minvu], 2008). Una de las especies icónicas de las formaciones xerofíticas es *Vachellia caven* (Molina) Seigler & Ebinger, árbol espinoso que se distribuye a lo largo de Chile central.

Considerando el contexto de megasequía que atraviesa la región, la comuna de Petorca toma relevancia para conocer la relación entre el crecimiento de la vegetación xerofítica endémica y la variabilidad climática a diferentes escalas.

La presente tesis plantea estudiar la respuesta de un árbol indicador de la vegetación xerofítica (*V. caven*) frente al cambio climático, en una región altamente afectada por condiciones de sequía persistente (comuna de Petorca), utilizando los anillos de crecimiento como un indicador ecológico indirecto (*proxy*) del clima local en la cuenca alta del río Petorca. Esta investigación pretende aportar información a la región con datos sumamente escasos y nuevos.

Objetivo general:

Evaluar el potencial dendrocronológico de *V. caven* como un indicador del cambio climático en un área de formación xerofítica en la cuenca alta del río Petorca.

Como objetivos específicos se plantean:

1. Analizar la anatomía de los anillos de crecimiento de *V. caven* como potencial *proxy* ecológico y climático.
2. Desarrollar una cronología de ancho de anillo de una población de *V. caven* en la comuna de Petorca, Región de Valparaíso.
3. Evaluar la correlación entre la cronología de la especie y variables climáticas locales, regionales y globales.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio

La región de estudio se encuentra en la cuenca alta del río Petorca, situada aproximadamente en -32.24°S -70.706°W (Figura 1). Esta cuenca presenta un clima mediterráneo, con características semiáridas e influencia oceánica, de relieve y de altura. El Bioclima pre andino donde la población de *V. caven* esta inserta posee una temperatura media anual de 8.8°C , amplitud térmica anual de 9.2°C , precipitación media anual de 367 mm (Luebert & Pliscoff, 2012), y un periodo seco de ocho meses (Reyes & Zamora, 2009), todo esto en un suelo caracterizado por rocas volcánico-sedimentarias (Müller, 1999).

Además, tanto la cuenca como toda la Región de Valparaíso están insertos en una zona de transición vegetacional entre las formaciones semiáridas y las formaciones mediterráneas, caracterizándose por la presencia de formaciones esclerófilas y, en exposición norte, formaciones de arbustos y cactáceas de tipo xerofíticas, destacando entre los árboles el espino (*Vachellia caven*), guayacán (*Porlieria chilensis*), algarrobo (*Neltuma chilensis*), colliguay (*Colliguaja odorifera*) entre otros (Venegas A., obs. pers.) (Figura 1).

El río Petorca nace de la confluencia del río sobrante y el río Pedernal, y se desarrolla con una pendiente media de 3.22% en dirección al Sur – oeste, con un recorrido de 72 km para desembocar en el mar (Salazar, 2013). La red hidrográfica es de origen predominantemente pluvial (Instituto Nacional de Derechos Humanos [INDH], 2014) y escurre por un valle típico de los valles transversales de la zona central, caracterizándose por la utilización de sus aguas para riego en Petorca.

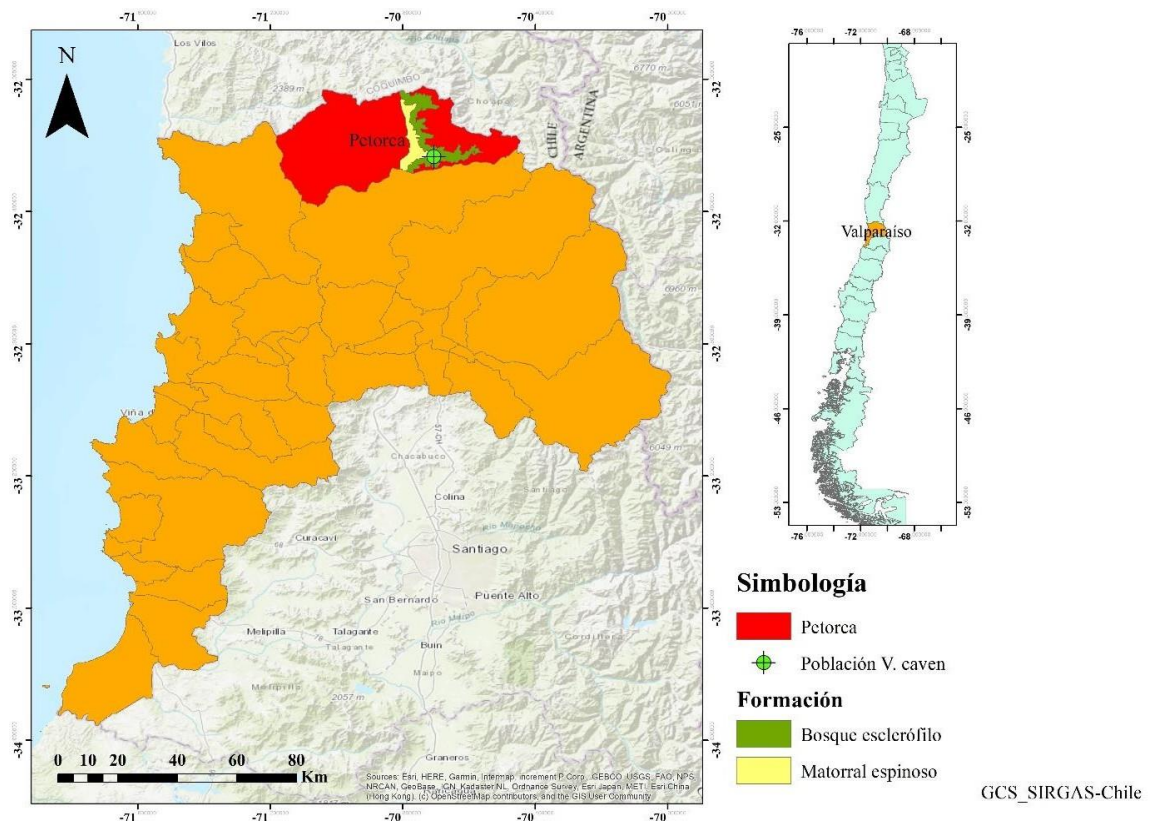
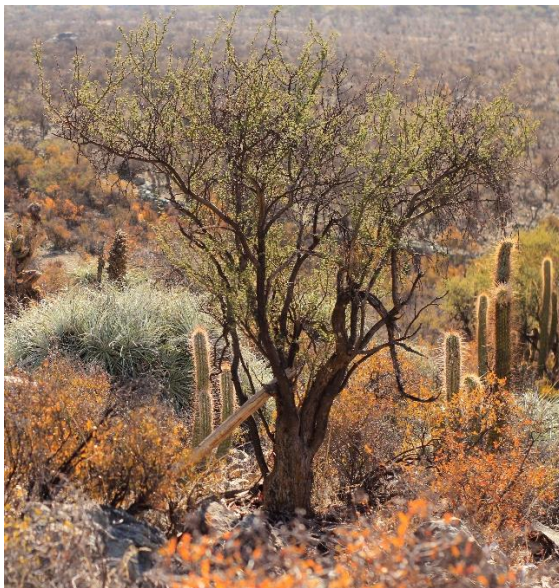


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de muestreo de *V. caven* en la comuna de Petorca, Región de Valparaíso, Chile.

2.2 Especie de estudio

Este estudio se centró en el árbol *Vachellia caven* (Figura 2a), debido a que es un indicador de un ecosistema xerofítico clásico en la región mediterránea de Chile, con amplia distribución en el gradiente latitudinal y altitudinal (Gajardo, 1983). Esta especie es de la familia Fabaceae, nativa de Chile, Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. En Chile su distribución comprende desde la provincia de Copiapó (Región de Atacama) hasta la Región del Biobío (Benedetti–Ruiz, 2012). Habita suelos con exposición Norte, pedregosos y usualmente pobres en nutrientes. Es considerado árbol o arbusto espinoso, formando bosques abiertos puros o asociados a especies esclerófilas (Retamales & Morales, 2022). Si bien en condiciones óptimas puede alcanzar hasta los siete metros de altura y diámetros de 50 cm, actualmente la población de estudio presenta individuos achaparrados y densamente ramificados desde la base (Venegas A., obs. pers.) (Figura 2a). El tronco es tortuoso, de corteza dura agrietada, copa abierta y expandida con hojas semicaducas compuestas, bipinnadas y pequeñas. Además, posee espinas blanquecinas, y flores hermafroditas dispuestas en glomérulos amarillo – dorado. Su fruto es una legumbre coriácea, indehisciente de color oscuro con apéndice terminal punzante, posee entre 15–22 semillas por fruto con variación de color verde – café según su estado de maduración (Donoso, 1974; Rodríguez et al., 1983).

La madera, desde el punto de vista macroscópico, presenta una coloración blanco amarillento y castaño rojizo, diferenciando claramente la albura del duramen respectivamente (Figura 2b). Se caracteriza por una densidad de 0.83 a 1 g/cm³ en el duramen (Benedetti–Ruiz, 2012), presentando una resistencia a la degradación y gran dureza dificultando la toma de muestras con taladros de incremento. La madera presenta poros que forman bandas confluentes, donde el ancho de los anillos puede llegar a ser tres veces menor que el diámetro de los poros (Díaz–Vaz, 1979). Los radios son de trayectoria sinuosa y en ocasiones multiseriados.



(a)



(b)

Figura 2. a) Aspecto general de la especie de estudio (*V. caven*). b) Corte transversal del tronco con clara diferenciación de albura y duramen.

2.3 Diseño de estudio

2.3.1 Muestreo

Se colectaron 15 secciones transversales (15 individuos), de los cuales, un árbol estaba muerto y 14 vivos. En los individuos vivos, debido a la gran regeneración vegetativa que posee el espino, es decir, en tejido meristemático en el tronco a nivel del suelo crecen vástagos (Benedetti–Ruiz, 2012), se extrajo una muestra bajo el criterio de que el árbol debiera ser multifustal presentando mínimo cuatro a cinco vástagos para no ocasionar un daño significativo al cortar uno. Se midió altura del individuo y se utilizó una sección recta a la altura del pecho (1.3 metros) para extraer las rodela (cortes transversales) con motosierra.

Las muestras fueron lijadas con un cepillo eléctrico con granos progresivamente más finos desde 80 a 600 g/cm² con el fin de observar a escala microscópica (10-100x) los anillos de crecimiento diferenciados por el aplastamiento radial de las fibras del leño tardío, datados al año de formación, siguiendo la metodología descrita por Stokes y Smiley (1996).

2.3.2 Anatomía de la especie

Para describir la estructura anatómica microscópica de la especie, se extrajo de una rodela un segmento de 1.5 x 3.5 cm, luego se lijó y ablandó hirviéndose en agua con glicerina. Se utilizó un micrótopo deslizante para realizar los cortes

histológicos, siendo obtenidos con un grosor de 18–25 μm en el plano transversal de la madera.

Las secciones resultantes fueron transferidas a un portaobjeto y montadas en glicerina según metodología de SASS (1951), luego se observó la estructura celular a través de un microscopio óptico.

2.3.3 Desarrollo de la cronología

Se siguió cada anillo en torno a la circunferencia de cada rodela para examinar sus características distintivas y así determinar los anillos año a año. De cada rodela se desarrollaron dos segmentos de datación.

Se utilizaron dos metodologías para el desarrollo de la cronología, en la primera se utilizó una lupa estereoscópica para el conteo de anillos, luego se empleó una Tabla Unislide VELMEX con una precisión de 0.001 mm conectada a un contador digital para medir el ancho de los anillos (Figura 3). Esta metodología se denominó “met 1” (Velmex).



Figura 3. Primera metodología para desarrollar la cronología utilizando una lupa estereoscópica conectada a una Tabla Unislide VELMEX y a un contador digital (met 1).

La segunda metodología consistió en escanear todas las rodela con un escáner EPSON Expression 11000XL para capturar imágenes digitales de alta resolución, luego en el programa CooRecorder 9.8.1 se midió manualmente anchura de los anillos de crecimiento con su escáner de oficina estándar (Figura 4), desarrollando dos segmentos por imagen y con el programa Cdendro 9.8.1 se exportó como archivo txt. Esta metodología se denominó “met 2” (CooRecorder).

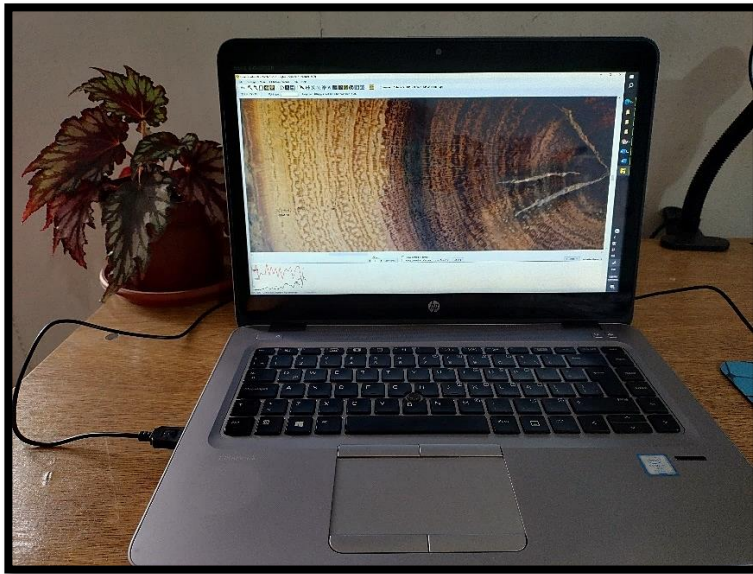


Figura 4. Segunda metodología para desarrollar la cronología utilizando el programa CooRecorder 9.8.1 (met 2).

En ambas metodologías se utilizó la datación cruzada para encontrar visualmente coincidencias en los patrones de anillos y establecer años marcadores entre los árboles para construir la secuencia cronológica más allá de la vida de un solo árbol, estableciendo así una cronología maestra que abarca a la población siguiendo la convención establecida por Schulman (1956) para el hemisferio Sur, en la que se asigna a cada anillo de crecimiento la fecha en la que comenzó su crecimiento, coincidiendo con el inicio de primavera.

La calidad y validación del cofechado de ambas cronologías fue analizada con el programa COFECHA (Holmes, 1983) por separado, donde se evalúa la correlación entre las dos series individuales de cada árbol, y luego entre todas

las series de los diferentes árboles, para reconocer los patrones en los anillos de crecimiento y determinar el grado de coincidencia temporal entre las muestras. Además, el programa se usó para la identificación de anillos ausentes o falsos basado en la suposición de que todas las series de los árboles que comparten un mismo sitio geográfico deben compartir patrones de crecimiento en respuesta al clima.

Las series de ancho de anillos resultantes fueron estandarizadas usando ARSTAN (Cook, 1985), con el fin de eliminar tendencias biológicas del árbol y minimizar la variabilidad que no sea atribuible al clima en el crecimiento de la población. Estas cronologías sin tendencias de crecimiento (cronología residual) serán comparadas entre ellas para ver cual tiene mejor correlación entre los individuos y esa será comparada con la variabilidad del clima local, regional y global.

Tanto en la primera metodología (met 1) como en la segunda metodología (met 2), se utilizó la señal poblacional expresada (EPS) para cuantificar la fuerza de señal de crecimiento común a lo largo del tiempo (Gutiérrez, 2009) y realizar ajustes en la cronología cuando esta señal se debilitaba. Se usó una técnica que consiste en ajustar a una curva suave los datos de ancho de anillo utilizando una función de interpolación cubica para remover variación a largo plazo llamada *spline* de suavizado cubico, probando con 32 años en met 1 y 42 años en met 2,

y una ventana de barra r (intervalo de tiempo específico utilizado para calcular respuesta climática de los árboles) (Wigley et al., 1984) de 16 años en met 1 y de 14 años en met 2, todo esto con el fin de encontrar la cronología con el valor más alto de EPS para cada segmento.

2.3.4 Análisis de la variabilidad climática

Con el fin de analizar la influencia del clima a diferentes escalas en el crecimiento de los árboles, se recolectó información sobre las variables locales, regionales y globales (Tabla 1).

Las variables regionales y la precipitación fueron extraídas de TerraClimate, disponible en la plataforma de Google Earth Engine (GEE). La temperatura máxima y mínima de Climate Research Unit (CRU) series TS 4.03 disponible en The Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), y los forzantes climáticos globales se obtuvieron de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration) (NOAA)). Todas las bases de datos comprenden el periodo común con la cronología de los anillos de crecimiento.

Tabla 1. Variables y/o forzantes climáticos de estudio.

Local	Regional	Global
-------	----------	--------

Precipitación mensual (acumulación de lluvia)	Déficit de presión de vapor (VPD) (medida de sequedad del aire comparada con su capacidad máxima)	Índice multivariado del Niño Oscilación del Sur (MEI v.2) (intensidad del ENOS, combina variables oceánicas y atmosféricas)
Temperatura máxima mensual (valores máximos extremos)	Déficit hídrico climático (DEF) (insuficiencia de agua en relación con la demanda evaporativa)	Modo Anular del hemisferio sur (SAM) (variabilidad del cinturón de vientos circumpolares)
Temperatura mínima mensual (valores mínimos extremos)	Evapotranspiración real (aet) (cantidad de agua que se pierde al ambiente en procesos de la planta)	
	Equivalente de agua de nieve (swe) (cantidad de agua obtenida del	

derretimiento de la
nieve)

Humedad del suelo (soil)

Índice de gravedad de
sequía de Palmer (pdsi)
(cuantifica la sequía)

Presión de vapor (vap)
(vapor de agua en el
aire)

Todas estas variables fueron sometidas a un análisis de correlación múltiple de Pearson, para eliminar las que presentaran colinealidad. Así se redujo la cantidad de variables con mismo comportamiento y se analizaron las más representativas.

2.3.5 Correlación entre cronología y variables climáticas

El método utilizado para comparar anillos de crecimiento con variaciones climáticas es la función de correlación (Zang & Biondi, 2015), que consiste en correlacionar la variación interanual en el ancho de anillos de crecimiento de la cronología residual con fluctuaciones climáticas interanuales mes a mes. Se usó

el coeficiente de correlación múltiple de Pearson (evalúa todos contra todos para comparar el crecimiento anual de los anillos con los datos climáticos en intervalos de tiempo de 1–12 meses). El objetivo era determinar el mes que mostró la mayor relación en la cronología, considerando hasta dos años antes del crecimiento actual, debido que se ha demostrado que el crecimiento radial esta influenciado por las condiciones climáticas de hasta 36 meses en Chile central (Venegas–González et al., 2018). Este análisis se realizó con la rutina Klima-Trees realizada por ÁlvaroGonzález-Reyes (https://github.com/lonkotrewa/KLIMA_trees/blob/master/KLIMA_TREES_2020.R).

III. RESULTADOS

3.1 Anatomía de los anillos de crecimiento de *Vachellia caven*

La estructura celular de las secciones indica que *V. caven* tiene anillos de crecimientos bien definidos, demarcados con parénquima terminal que presenta 1 o 2 células de ancho indicando el final de la temporada de crecimiento, se visualizan radios distendidos (fibras con paredes muy gruesas). Además, se observa parénquima paratraqueal en bandas interrumpidas, es decir, no son continuas (Figura 5). Esta distribución a través de la rodela dificulta la delimitación del anillo de crecimiento.

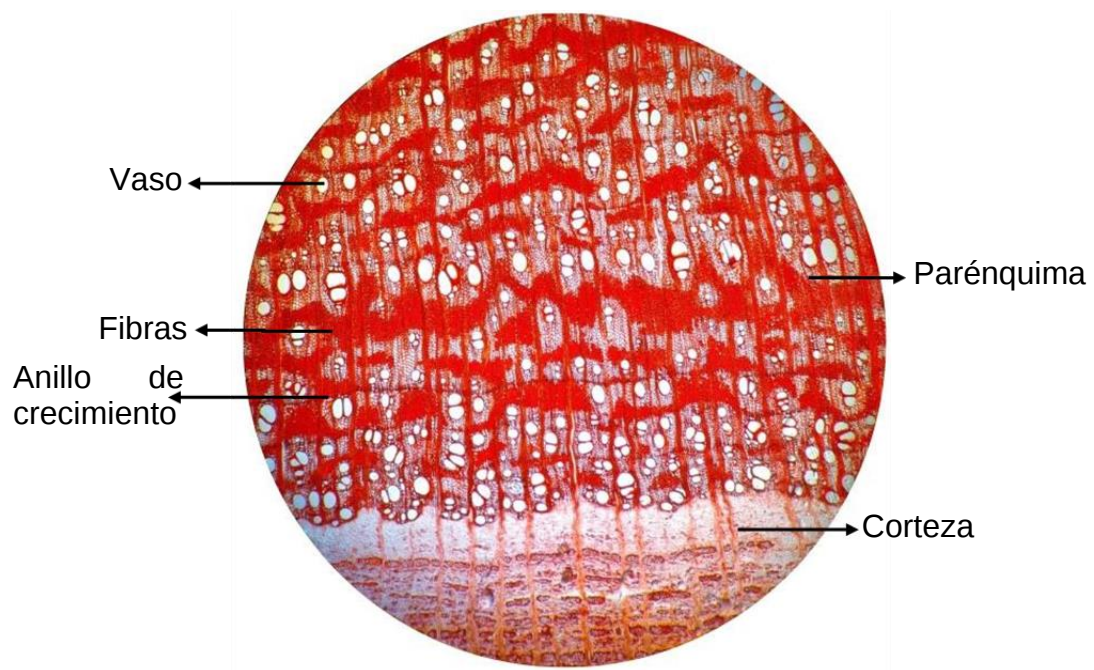


Figura 5. Sección transversal de *V. caven*.

Los anillos de crecimiento se reconocieron mediante la observación de una delicada línea continua de células de parénquima terminal, la cual estaba precedida por una fila de vasos de mayor tamaño al iniciar un nuevo anillo (Villalba et al., 2000) (Figura 6). Se supone que el periodo de formación de cada anillo responde al fin del invierno e inicio de primavera, marcando la fase vegetativa de crecimiento entre agosto/septiembre – mayo/junio del año calendario siguiente (Cornejo & Gandara, 1980).

3.2 Características de los árboles estudiados

La altura de los individuos osciló entre los 3.2 a 1.7 m, y la edad estimada del individuo más longevo comprende el periodo desde 1980 a 2021 (42 años). El diámetro de las rodela varió desde 8.95 a 5 cm con una media poblacional de 6.7 cm.

Al tener un diámetro pequeño, los segmentos para la demarcación de los anillos eran más pequeños aún (Figura 6a), lo que dificultaba la visualización y correcta marcación entre cada anillo. Además, cabe destacar que se observó una gran variabilidad en el ancho de anillo entre un año y el otro, ya que un año era muy grande, y el próximo extremadamente pequeño, por lo que no existía un patrón claro y común entre los anillos (Figura 6b) lo cual indicaba la variabilidad en respuesta a algún factor externo. La coloración de la madera fue igual en todos los individuos con un color café amarillento en la albura y café oscuro en el

duramen, siendo más fácil reconocer el parénquima terminal en el duramen ya que los anillos estaban más separados por el crecimiento en sus primeros años de vida, y por el contraste duramen – parénquima. Sin embargo, cabe destacar que en toda la rodela existía un alineamiento de vasos paralelo a los anillos, por lo que siempre se tuvo que seguir cada anillo por todo el disco para poder diferenciar si era un anillo continuo o vasos alineados.



(a)

(b)

Figura 6. a) Segmentos de demarcación para anillos de crecimiento de *V. caven*. b) Anillos de crecimiento demarcados por la línea de parénquima terminal, con fuerte variabilidad en el ancho de ellos.

3.3 Construcción de la cronología de anillo de crecimiento

En met 1 se midieron 15 series de 10 individuos, mientras que en met 2 se estudiaron 28 series de los 15 individuos. Se obtuvo una cronología máster por cada metodología de medición de anillos, abarcando desde el año 1990 a 2021 para met 1, y desde 1980 a 2021 para met 2.

Finalmente, en met 2, se seleccionaron las series con mayor correlación con la cronología máster y se obtuvo una cronología final compuesta por 20 series.

En met 1, se reconoce una correlación baja entre los individuos de la población (0.293) con un periodo de tiempo acotado a 32 años, sin embargo, en met 2 se obtiene una correlación significativa de 0.462 en un periodo de 42 años y una sensibilidad media de 0.751. Los resultados de la segunda metodología sugieren una sincronización efectiva en el crecimiento radial entre los individuos dentro de la población estudiada, además de indicar que el crecimiento de los árboles es sensible a su variabilidad anual de crecimiento (Tabla 2).

Tabla 2. Correlación entre los individuos de la población con la primera metodología y la segunda metodología.

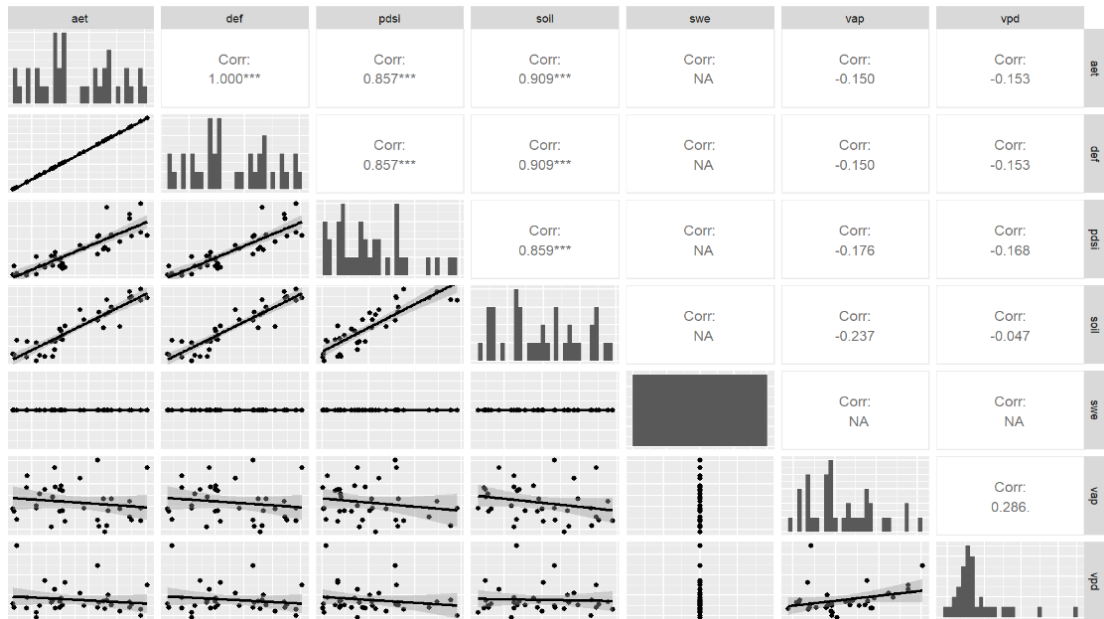
Individuo	Metodología 1 (Velmex)		Metodología 2 (CooRecorder)	
	Intervalo de tiempo	Correlación entre individuos	Intervalo de tiempo	Correlación entre individuos
1	1990 – 2021	.338	2000 – 2021	.373

2	1991 – 2021	.288	1992 – 2021	.589
3	1994 – 2021	.481	1994 – 2021	.417
4	1997 – 2021	.332	1980 – 2021	.830
5	2003 – 2021	.238	2000 – 2021	.512
6	1996 – 2021	.346	2000 – 2021	.512
7	2002 – 2021	.066	1982 – 2021	.545
8	1994 – 2021	.294	2004 – 2020	.590
9	1996 – 2021	.574	1985 – 2021	.366
10	1998 – 2021	-.106	1996 – 2021	.290
11			1983 – 2021	.325
12			1989 – 2021	.401
13			1994 – 2021	.329
14			1983 – 2021	.336
15			1991 – 2021	.396
TOTAL		.292		.462

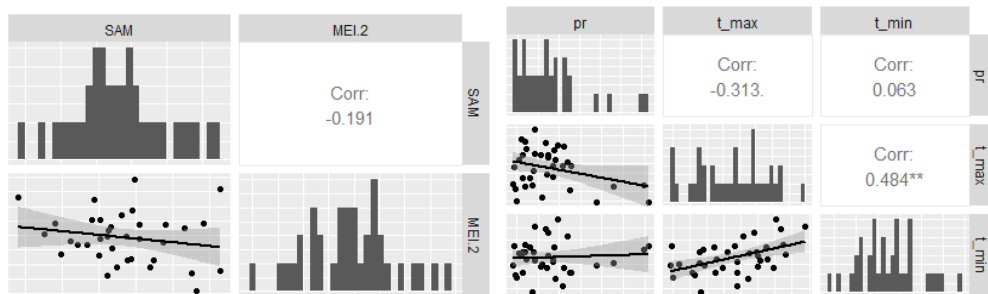
3.4 Correlación entre la cronología de la especie y variables climáticas locales, regionales y globales

Se sometieron a un análisis de correlación múltiple de Pearson las 12 variables climáticas consideradas inicialmente (Figura 7), siendo eliminadas del análisis la evapotranspiración real, índice de gravedad de sequía de Palmer, humedad del suelo, equivalente de agua de nieve y presión de vapor, ya que resultaron redundantes por sus valores de colinealidad (Tabla 1). Esto dio como resultado que las variables locales, regionales y globales que no presentaban colinealidad y brindan información complementaria fueran la precipitación mensual (pr),

temperatura máxima ($t_{\max}$) y mínima ($t_{\min}$), el déficit hídrico climático (DEF), déficit de presión de vapor (VPD), Índice Multivariado del ENOS (MEI v.2) y el Modo Anular del Sur (SAM).



(a)



(b)

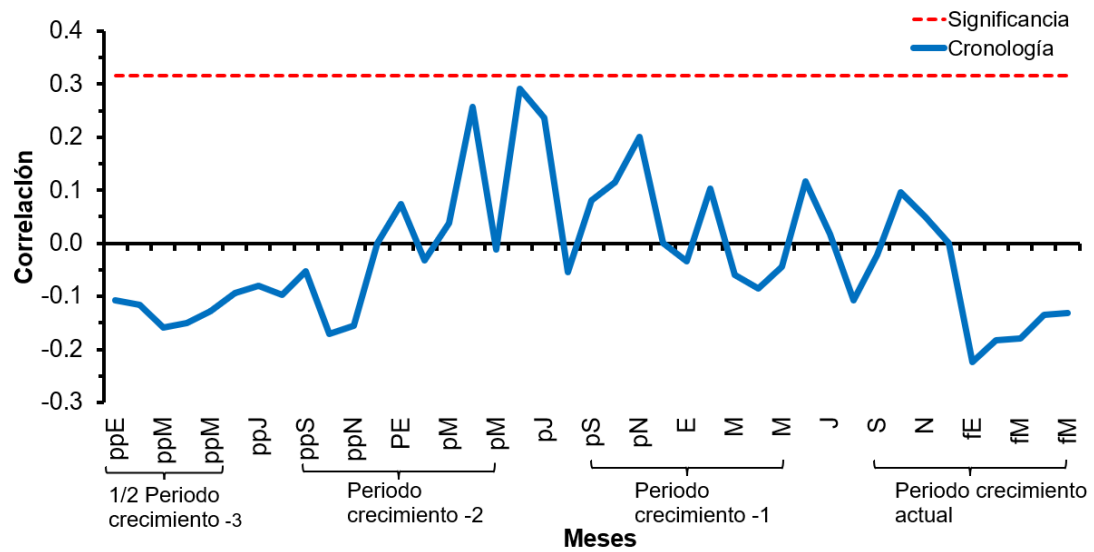
(c)

Figura 7. Matriz de correlación múltiple de Pearson de las variables climáticas a) Regionales. b) Globales. c) Locales.

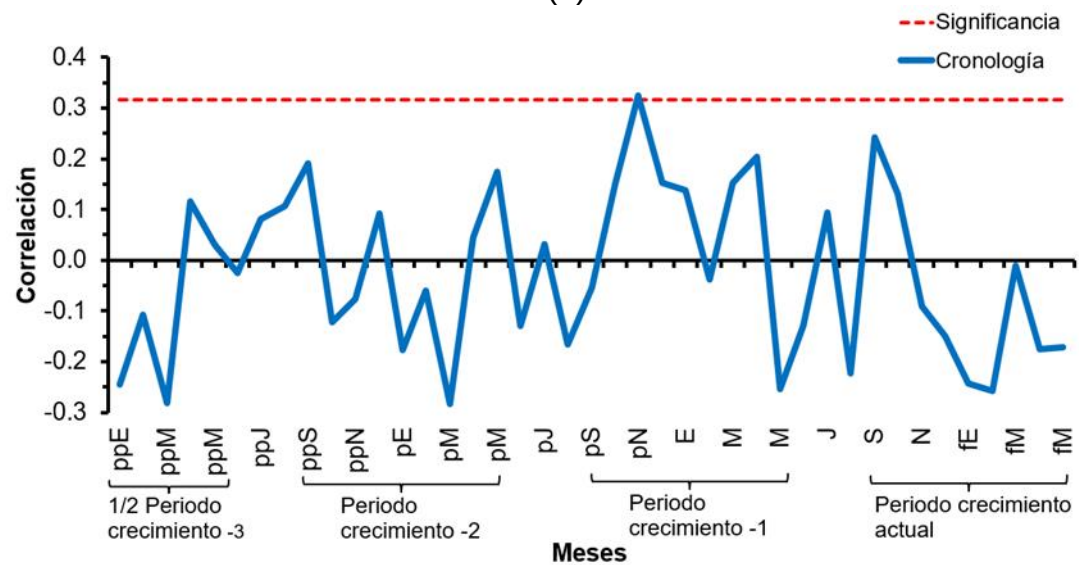
Para todos los análisis de correlación con las variables climáticas se utilizó la cronología residual obtenida de ARSTAN de met 2, mostrando la influencia de la mayoría de estas variables en el crecimiento de *V. caven*.

3.4.1 Sensibilidad climática con variables locales en el crecimiento radial

La cronología no mostró una correlación significativa con la variable de temperatura máxima (Figura 8a), indicando una nula influencia en el crecimiento de *V. caven*. Sin embargo, con la temperatura mínima se reconoce una correlación positiva significativa ($r=0.32$, $p<0.05$) en el periodo de crecimiento del año previo en noviembre (pN) (Figura 8b).



(a)



(b)

Figura 8. Correlación de la cronología con a) la temperatura máxima desde ppE (1° mes) a fM (41° mes) b) la temperatura mínima desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).

La precipitación acumulada mostro una correlación positiva significativa con el crecimiento de *V. caven* tres años previo terminando el periodo de crecimiento en marzo (ppM) ($r=0.34$, $p<0.05$), en el año actual antes de la estación de crecimiento en el mes de julio (J) ($r=0.51$, $p<0.05$) y en octubre (O) en pleno crecimiento ($r=0.34$, $p<0.05$) (Figura 9) a lo largo de los 42 años. Las precipitaciones del mes de julio tienen una mayor influencia en el crecimiento de la especie observándose su sensibilidad en la mayoría de los años, destacando los años extremos 1984 y 1987 (Figura 10).

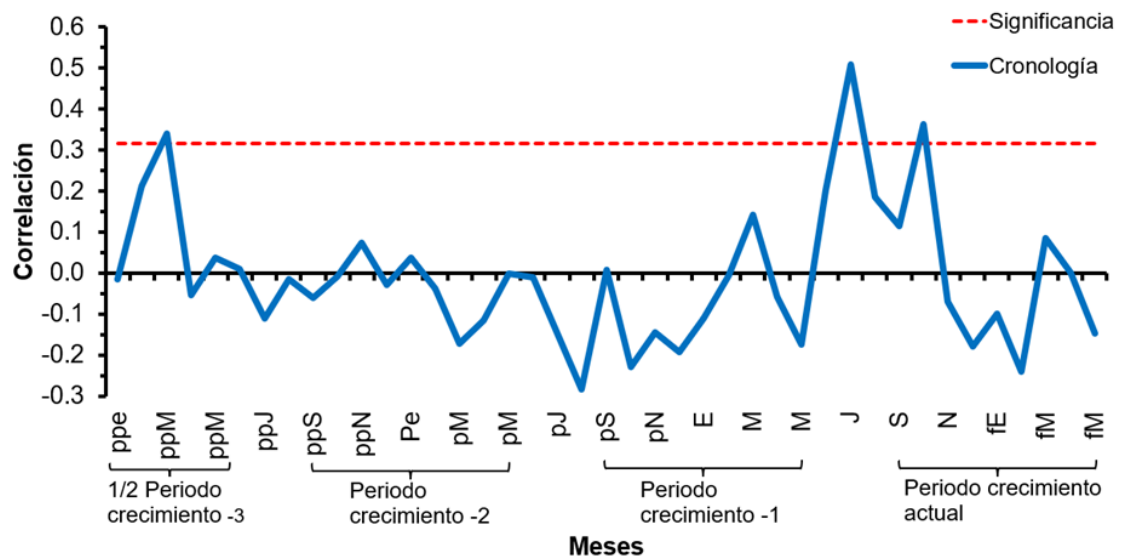


Figura 9. Correlación de la cronología con la precipitación desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).

La Anomalía refiere a la cronología residual y a la estandarización de la precipitación, se denomina de esta manera debido a que permite observar la

variación anual tanto en la cronología como en la precipitación. Esta estandarización da paso a la comparación directa, facilitando la interpretación de los resultados en términos de desviaciones estándar con respecto a la unidad de medida de la precipitación. Para la cronología, la unidad de medida es el ancho del anillo, mientras que para la variable climática local precipitación es milímetros. Se observa la relación temporal entre la cronología residual y la anomalía de la precipitación de julio del año actual de crecimiento, destacando la estrecha asociación entre ambas series, especialmente durante la megasequía (Figura 10).

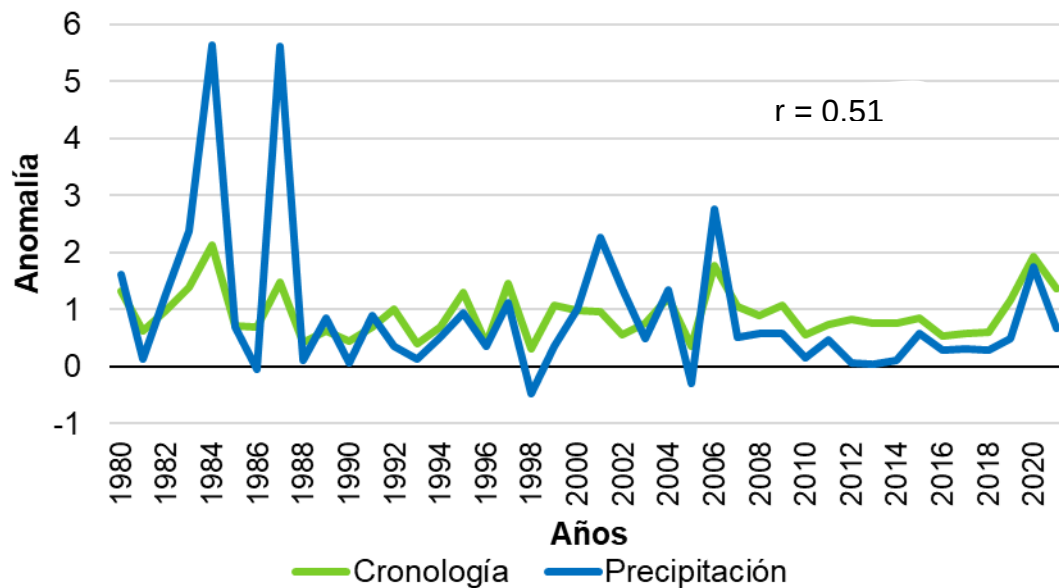


Figura 10. Correlación entre el crecimiento de *V. caven* con la precipitación del mes de julio desde el año 1980 a 2021.

3.4.2 Sensibilidad climática con variables regionales en el crecimiento radial

Se observó una correlación significativa negativa entre el DEF y la cronología de *V. caven* en el mes de julio (J) del año actual de crecimiento ($r=-0.32$, $p<0.05$) (Figura 11), indicando que la región está experimentando una falta de agua en comparación con las necesidades climáticas de las plantas, desencadenando un posible estrés por sequía en los árboles.

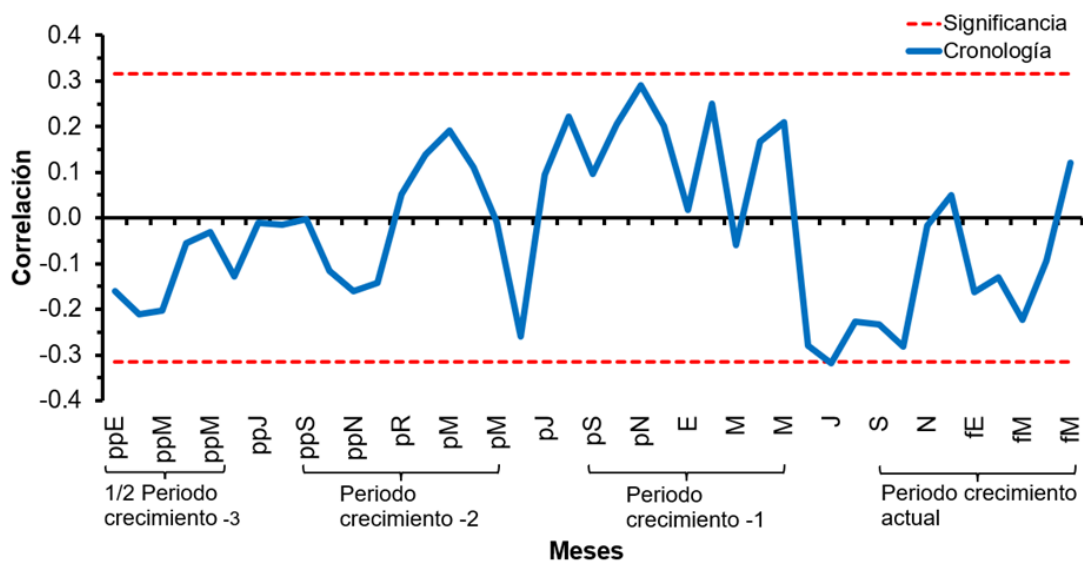


Figura 11. Correlación de la cronología con el déficit hídrico climático desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).

El VPD es una medida utilizada para cuantificar la sequedad del aire (Lemenkova, 2022) y se observa una correlación significativa positiva con la cronología de *V. caven* en el período octubre/noviembre del año de crecimiento previo (pO/pN)

($r=0.35/0.37$ respectivamente, $p<0.05$), luego en el periodo invernal en el mes de mayo (M) ($r=0.35$, $p<0.05$) y en junio (J) se observa una correlación negativa ($r=-0.33$, $p<0.05$) (Figura 12). Evidenciando que el crecimiento de la especie es influenciado por la sequedad existente.

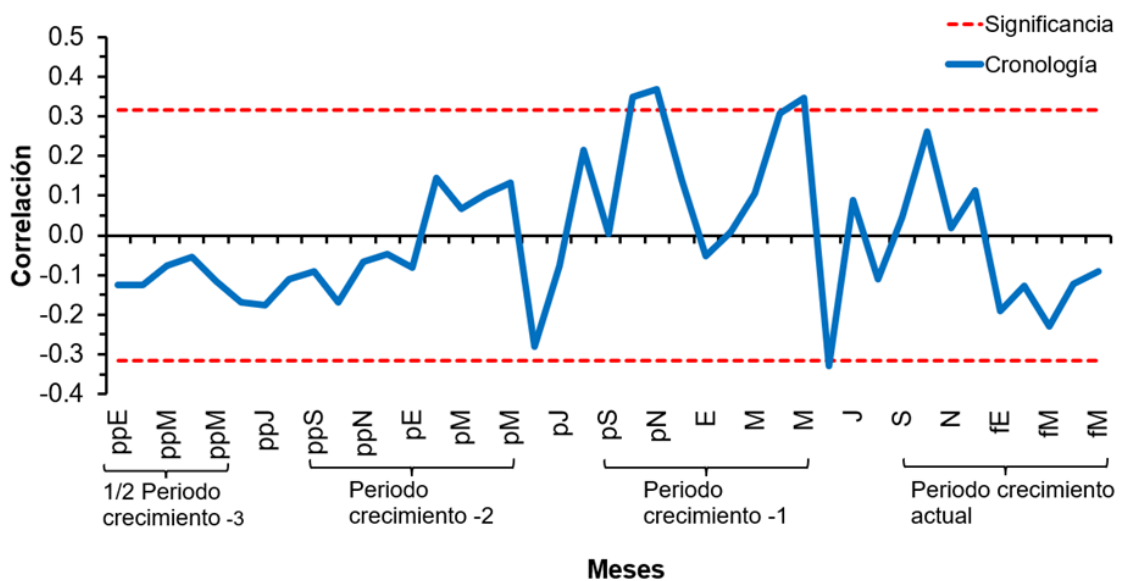


Figura 12. Correlación de la cronología con el déficit de presión de vapor desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).

3.4.3 Sensibilidad climática con variables globales en el crecimiento radial

La relación entre el SAM y el crecimiento radial mostró una correlación positiva significativa dos años previo en el mes de septiembre (ppS) ($r=0.41$, $p<0.05$), es decir, los árboles 24 meses anteriores al mes corriente tienen una sensibilidad positiva al SAM durante el mes donde inicia su crecimiento (Figura 13).

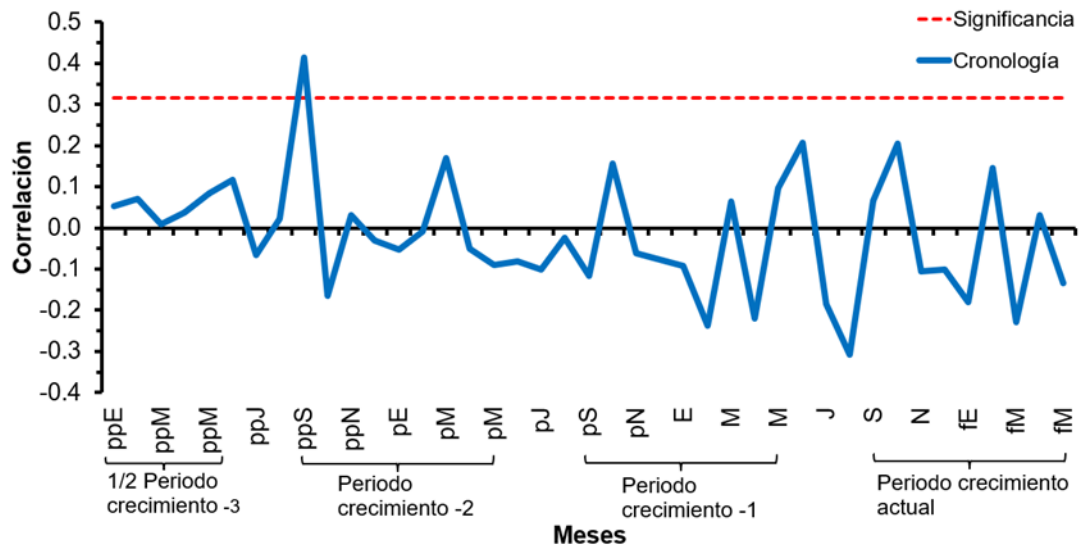


Figura 13. Correlación de la cronología con el Modo Anular del Sur desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).

El MEI v.2 posee una correlación no significativa con la cronología (Figura 14), es decir, no existe evidencia para establecer que posee una influencia sobre el crecimiento radial de *V. caven*.

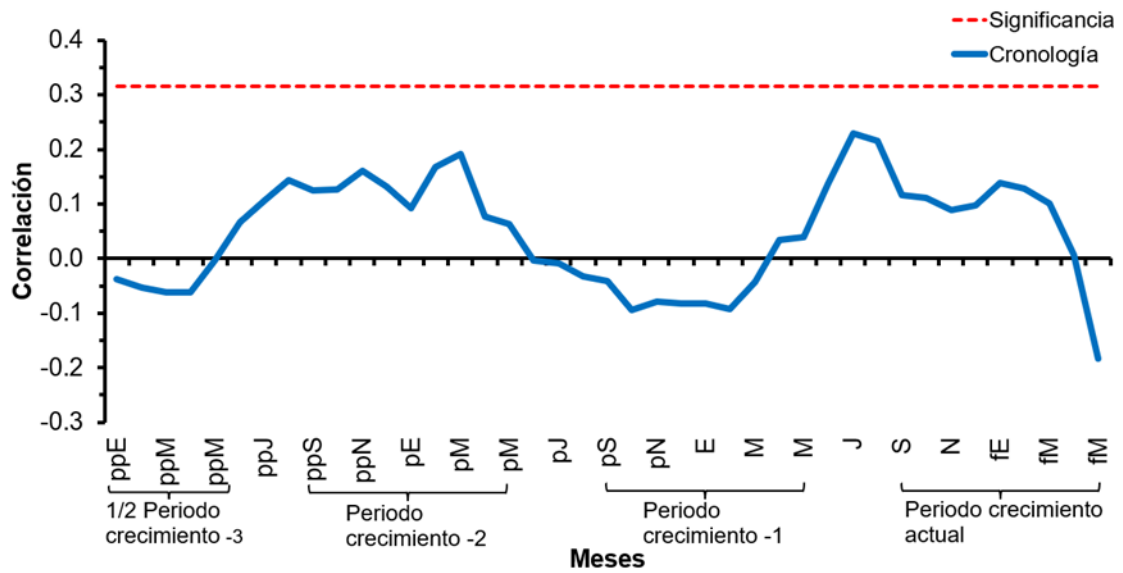


Figura 14. Correlación de la cronología con el Índice Multivariado del ENOS desde ppE (1° mes) a fM (41° mes).

IV. DISCUSIÓN

4.1 Anatomía de la madera y anillos de crecimiento de *V. caven*

Microscópicamente, se identificaron los límites de los anillos de crecimiento mediante una delgada franja de parénquima terminal, similar a lo observado en numerosas angiospermas subtropicales en América del Sur (Lisi et al., 2008; Ramírez & del Valle, 2011; Ferrero et al., 2014). Se caracterizó a *V. caven* como una especie con parénquima axial paratraqueal en bandas, al igual que otras especies del género *Vachellia* estudiadas en la selva caducifolia de México (Ramírez–Martínez et al., 2017).

Además, se observaron macroscópicamente anillos muy cercanos en ocasiones difusos con fuerte variabilidad de ancho de anillo en cada segmento, lo cual dio paso a dimensionar la dificultad para desarrollar la primera cronología en el país de esta especie, con ello también se entendió una de las razones de la escasez de cronologías de ancho de anillo en la zona mediterránea del país.

4.2 Cronología de ancho de anillo de *V. caven* en la cuenca del río Petorca

Los árboles, al estar situados geográficamente cercanos responden de forma similar a las condiciones del clima (Teneb et al., 2004), por lo que el crecimiento de estos debiera estar correlacionado de forma significativa entre los individuos.

Sin embargo, en las dos cronologías desarrolladas, la primera metodología no reflejó esta premisa, dado por la dificultad de la disposición de elementos en la madera y la complicada coincidencia visual común ya que son anillos muy pequeños que a simple vista no se distinguen, e incluso con la lupa estereoscópica es limitado el zoom para su correcta identificación.

Por otro lado, en la segunda metodología que utiliza el software CooRecorder, se evidenció una gran correlación entre los individuos de la población ($r=0.462$), lo cual demuestra la existencia de una señal común que estaría rigiendo el crecimiento sincrónico de los individuos de esta especie en la cuenca alta de la comuna de Petorca. Por lo tanto, se recomienda usar esta metodología para desarrollar cronologías de ancho de anillos en esta especie.

4.3 Análisis dendroclimático con variables locales, regionales y globales

La capacidad de *V. caven* para responder al clima a través de su crecimiento radial amplía el rango de especies aptas para investigaciones dendrocronológicas orientadas a comprender la variabilidad climática y las respuestas del ecosistema xerofítico frente al cambio climático.

4.3.1 Variables locales

El análisis dendroclimático reveló que la cronología de ancho de anillo de crecimiento responde de manera positiva a la disponibilidad de agua en el suelo durante el mes de julio. Además, la temperatura mínima durante el año previo en el periodo de crecimiento (noviembre), contribuye a evitar pérdida de agua por evapotranspiración, lo que promueve condiciones propicias para el crecimiento radial de *V. caven*. Estas condiciones se presentan como un patrón positivo en el crecimiento de varias especies leñosas emplazadas en el clima mediterráneo de Chile central (e.g., Le Quesne et al., 2006, Gutiérrez et al., 2008, Barichivich et al., 2009, Venegas–González, 2018), demostrando la importancia de las precipitaciones y el de la temperatura mínima para el crecimiento de los árboles.

Al periodo comprendido entre el año 2010 – 2022 se le ha denominado mega sequia ya que las precipitaciones han permanecido consistentemente por debajo de los promedios históricos (Miranda et al., 2023), coincidiendo con la cronología al reflejar un bajo ancho de anillo de crecimiento en *V. caven* en ese periodo, evidenciando una vez más la dependencia a las precipitaciones. Sin embargo, el hecho de que la especie haya creado anillos de crecimiento más pequeños por la baja de precipitaciones, no quiere decir que se encuentre en riesgo de morir o que este en decaimiento, ya que faltarían más estudios a nivel fisiológico para determinar esto (eficiencia en el uso del agua, reservas energéticas, variación temporal de vasos, etc.). En este sentido, recientemente un estudio aplicado a *Kageneckia angustifolia* (especie del matorral altoandino de Chile central),

determinó que posee una plasticidad al aumentar la cantidad de vasos y disminuir sus tamaños en respuesta a la intensidad de la sequía, con esto los anillos de crecimiento son más pequeños y así asegura una mayor seguridad hidráulica reduciendo riesgo de cavitación (Santini et al., 2024).

Por otro lado, en el período 2019 – 2020 se experimentó una hipersequía (Álvarez–Garreton et al., 2021). No obstante, se observaron precipitaciones durante el verano, lo cual influyó en un incremento en el ancho de anillo de crecimiento de ese año. Además, considerando que hubo precipitaciones en el verano del 2016, y los resultados de esta investigación arrojan una influencia en el crecimiento 3 años previos evidencia la relación lluvia–crecimiento en *V. caven*.

A pesar de que la temperatura máxima no tiene correlación significativa para ser definida como variable limitante o favorable en el crecimiento de *V. caven*, la cronología coincidió temporalmente con el aumento en la temperatura observada desde 1980, por lo que desarrollar una cronología más antigua explicaría mejor la influencia del cambio climático y sus repercusiones en el ecosistema xerofítico de Chile central.

4.3.2 Variables regionales

Se ha planteado recientemente la aparición de un fenómeno global en el que se observa un aumento en la mortalidad de árboles y una reducción en su

crecimiento. Este fenómeno se atribuye al incremento de sequías y déficit hídrico (DEF) en diversos ecosistemas forestales, y existe la posibilidad de que se agrave en un futuro próximo (Allen et al., 2015).

La variable DEF es la diferencia entre la evapotranspiración de referencia mensual con la evapotranspiración real y necesita saber la capacidad de extracción de agua del suelo por parte de la planta (Abatzoglou et al., 2018). Se observó una correlación negativa significativa durante el invierno (julio) con respecto al crecimiento de *V. caven*, lo que sugiere que la región experimenta una escasez de agua en relación con las necesidades de las plantas para llevar a cabo sus procesos vitales, lo que afecta su crecimiento radial. Esta falta de agua se hace evidente en toda la cuenca, reflejándose en la insuficiencia de recursos hídricos superficiales, una situación que no puede ser mitigada con recursos subterráneos, ya que estos solo están disponibles en las áreas más bajas (Espinosa et al., 2008).

El VPD indica el déficit entre la humedad efectiva presente en el aire y la cantidad máxima teórica de humedad que el aire puede retener cuando alcanza la saturación (Lemenkova, 2022), siendo una medida importante en la ecología, ya que provoca el cierre estomático limitando la fotosíntesis y la tasa de transpiración de las plantas (MacDowell et al., 2020). Al presentar una correlación positiva con la cronología en octubre/noviembre previo y mayo actual, indica que

influye en tener mayor ancho de anillos en la etapa de crecimiento, esta variable puede estar incidiendo positivamente en la especie por sus rasgos funcionales de alta conductancia, baja estatura y pequeña área foliar (MacDowell & Allen, 2015).

Por otro lado, se reconoce una correlación negativa con la cronología al final del invierno (julio), puede deberse al aumento que se ha visto de la temperatura en invierno y con ello a un VPD creciente provocando que las plantas transpiren más en estas condiciones, ya que el aire seco tiende a absorber más agua de las hojas, desencadenando mayor pérdida de agua y con ello anillos de crecimiento más pequeños.

4.3.3 Variables globales

El fenómeno climático SAM tiene un impacto significativo en la circulación atmosférica de las latitudes medias y altas del hemisferio sur. Estudios como los de Gong y Wang (1999), Marshall (2003) y Gillett et al., (2006) han demostrado su influencia, y este fenómeno está caracterizado por una variabilidad decadal (Yuan & Li, 2008). Sin embargo, el SAM ha demostrado un desplazamiento hacia su fase positiva, tendencia que se viene produciendo desde mediados de los años 1960 hasta la actualidad (Marshall, 2003), coincidiendo en gran medida con el periodo que abarca la población de estudio, y al correlacionar significativamente de forma positiva con la cronología estando en esta fase,

demuestra que a pesar de haber condiciones de sequedad en el centro de Chile, *V. caven* es influida aumentando el ancho de anillo de crecimiento. De hecho, si la tendencia positiva SAM continúa, en el futuro puede tener implicaciones en el cambio climático de todo el hemisferio sur de planeta (Gillet et al., 2006) y con ello en la dinámica ecológica.

Por otro lado, se pudo observar que el SAM posee una asociación en el crecimiento con 24 meses de desfase, pareciendo ser un patrón común en este forzante, debido a que, en la temperatura superficial del mar también tiene un desfase de años en presentar asociaciones (Ancapichún et al., 2015).

El MEIv.2 en los últimos 40 años la fase Niña ha sido más duradera que los años en fase Niño, considerando que la fase Niña refiere a una escasez de precipitaciones en la zona centro del país debido a menor temperatura superficial del mar (NOAA, 2023) y por consiguiente menor formación de nubes, se corrobora un mayor déficit hídrico en la zona mediterránea del país (Ovejero & Minetti, 2016; Álvarez–Garreton et al., 2021). Sin embargo, no presentó correlaciones significativas con la cronología de ancho de anillos, lo que puede deberse a que su influencia en verano sobre las precipitaciones es considerablemente más baja y alcanza significación solo para el sur de Chile central (Montecino & Aceituno, 2003).

Por otro lado, es curiosa la falta de correlación en otras estaciones del año ya que este forzante climático posee influencia especialmente en el norte y centro de Chile (Villalba, 2007).

V. CONCLUSIONES

La investigación dendrocronológica en ecosistemas con formaciones xerofíticas es complicada, pero no imposible con el método adecuado. Se verificó la formación de anillos de crecimiento anuales en *Vachellia caven* y al examinar la correlación en el ancho de los anillos entre individuos, se observó una asociación significativa en la segunda metodología utilizada (aplicación de imágenes digitalizadas y el software CooRecorder), por lo que se establece por primera vez a la especie nativa como una fuente de información dendrocronológica en la zona mediterránea del país.

Se sugiere adoptar una metodología alternativa al trabajar con esta especie, ya que, al encontrarse en una región con escasez hídrica, el ancho de sus anillos de crecimiento es diminuto. Además, su disposición de vasos en el fuste dificulta el trabajo dendrocronológico. La opción más adecuada sería crear una cronología de referencia mediante cortes histológicos de la madera, garantizando así la autenticidad de los anillos. Sin embargo, debido a la alta densidad de la madera, llevar a cabo este proceso es una tarea exigente que requiere experiencia. No obstante, si se logra realizar, contribuiría significativamente al análisis de crecimiento de las especies en formaciones xerofíticas.

Por otro lado, el crecimiento anual de la especie al ser correlacionado con diferentes variables locales, regionales y globales, presentó mayoritariamente asociaciones positivas de forma significativa revelando una capacidad de sobrevivir a condiciones climáticas inhóspitas.

Se determina que *V. caven* es sensible al cambio climático que se ha observado desde 1980 a la actualidad, por lo que se considera una especie *proxy* del clima local en la cuenca alta del río Petorca.

El análisis de los anillos de crecimiento permitió evidenciar que la precipitación es un factor limitante para el crecimiento fustal, debido a que se observa que, a menor disponibilidad de agua menor ancho de anillo, y viceversa. Esto podría estar afectando los procesos vitales del árbol por la diferencia en la demanda evaporativa de *V. caven*. Sin embargo, el árbol también podría estar compensando esto con la utilización de carbono no estructural o la redistribución de energía para diferentes procesos, reflejándose en la baja del ancho de anillo.

Se concluye la dependencia a la disponibilidad hídrica, lo cual, frente al escenario de cambio climático, ha demostrado que la especie se ve afectada por las condiciones de sequedad persistentes en Chile central, sin embargo, el mismo cambio climático ha provocado que la especie también se vea beneficiada ya que

al existir precipitaciones en verano ha ayudado significativamente a un mayor ancho de anillo.

Además, por ser una especie pionera y tener rasgos morfológicos como el crecimiento achaparrado y la forma bipinnada de sus hojas, se le puede atribuir resistencia a la sequía. Sin embargo, es primordial enfocar estudios a nivel genético para estimar hasta qué punto la especie puede seguir persistiendo en su crecimiento con las condiciones climáticas que se han desarrollado a lo largo de los años y que se pronostica se acentúen.

La investigación futura debería enfocarse en fortalecer la red de cronologías de espinos y otras especies de la formación xerofítica, ampliando su alcance en escala temporal y espacial, abarcando diversas condiciones de perturbación. Esto permitirá su aplicación en nuevas reconstrucciones climáticas y saber el grado de resiliencia frente al cambio climático, con ello también ayudaría a prever posibles extinciones y planear acciones concretas basadas en la naturaleza para la conservación de las especies que habitan en la zona mediterránea de Chile.

VI. GLOSARIO

Radios: Células de parénquima radial que se disponen transversalmente como líneas que se extienden desde el centro o médula de la madera hacia el cambium o la corteza.

Índice Multivariado del Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés): Forzante climático que evalúa simultáneamente múltiples variables, como la temperatura del mar y los vientos, para monitorear y predecir fenómenos climáticos como El Niño y La Niña en la región del Pacífico.

Modo Anular del Sur (SAM): Se calcula a partir de las diferencias de presión atmosférica entre las latitudes altas y bajas en el hemisferio sur, y refleja la variabilidad en la posición y la intensidad del cinturón de vientos circumpolares antárticos.

Déficit hídrico climático (DEF): Indica la escasez relativa de agua en comparación con las necesidades hidrológicas y ecológicas de un área específica.

Déficit de presión de vapor (VPD): Mide la diferencia, en términos de presión, entre el vapor de agua en el aire y el punto de saturación del aire, que es la cantidad máxima que el aire puede transportar a su temperatura actual.

Cofechado: Refiere al proceso de correlacionar y fechar muestras de anillos de árboles individuales o de múltiples árboles para establecer un cronograma de eventos pasados.

Dendroclimatología: Rama de la dendrocronología que se enfoca específicamente en el estudio de los anillos de crecimiento de los árboles para reconstruir patrones climáticos pasados.

VII. 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), 1-12.

Aceituno, P. (1990). Anomalías climáticas en la región sudamericana durante los extremos de la oscilación austral. *Revista Geofísica*, 32, 65-78.

Aldunce, P., Araya, D., Sapiain, R., Ramos, I., Lillo, G., Urquiza, A., & Garreaud, R. (2017). Local perception of drought impacts in a changing climate: The mega-drought in central Chile. *Sustainability*, 9(11), 2053.

Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and earth system sciences*, 25(1), 429-446.

Ancapichún, Santiago, & Garcés-Vargas, José. (2015). Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre la temperatura superficial del mar frente a la costa centro-norte de Chile. *Ciencias marinas*, 41(1), 1-20. <https://doi.org/10.7773/cm.v41i1.2338>

Arroyo, M. T., Marquet, P. A., Marticorena, C., Cavieres, L. A., Squeo, F. A., Simonetti Zambelli, J. A., Rozzi, R., & Massardo, F. (2006). El hotspot chileno, prioridad mundial para la conservación. *Diversidad de ecosistemas, ecosistemas terrestres*.

Arroyo, M. T., Robles, V., Tamburrino, Í., Martínez-Harms, J., Garreaud, R. D., Jara-Arancio, P., Pliscoff, P., Copier, A., Arenas, J., & Keymer, J. (2020). Extreme drought affects visitation and seed set in a plant species in the central Chilean Andes heavily dependent on hummingbird pollination. *Plants*, 9(11), 1553.

Barichivich J, Sauchyn. D.J, Lara. A. (2009). Señales climáticas en anillos de árboles de gran elevación de los Andes semiáridos del centro-norte de Chile: respuestas a la variabilidad regional y a gran escala. *Paleogeografía, Paleoclimatología, Paleoecología*, 281(3), 320-333.

Barría, P., Chadwick, C., Ocampo-Melgar, A., Galleguillos, M., Garreaud, R., Díaz-Vasconcellos, R., Poblete, D., Rubio-Álvarez, E., & Poblete-Caballero, D. (2021). Water management or megadrought: what caused the Chilean Aculeo Lake drying? *Regional Environmental Change*, 21, 1-15.

Benedetti Ruiz, S. (2012). Monografía de Espino. *Acacia caven* (Mol) Mol. 24

Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413-421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015GL067265>

Boninsegna, JA, Argollo, J., Aravena, JC, Barichivich, J., Christie, D., Ferrero, ME., Le Quesne, C., Luckman, BH, Masiokas, M., Morales, M., Oliveira, M., Roig, F., Srur, A., & Villalba, R. (2009). Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281 (3-4), 210-228.

Bravo, M., Flores, R., Galindo, R., Garreaud, R.D., Muñoz, E., Serey, A., & Viale, M. (2014). Determinación de posibles impactos en la gestión de los abastecimientos humanos de agua situados en la zona metropolitana de Chile, provocados por fenómenos asociados al cambio climático.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., & Krinner, G. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility.

Cook, E. R. (1985). A time series analysis approach to tree ring standardization (dendrochronology, forestry, dendroclimatology, autoregressive process). The University of Arizona.

Cornejo Espósito, R., & Gándara Welch, J. (1980). Influencia de la estrata arbustiva en la productividad de la estrata herbácea en la estepa de *Acacia caven* (Mol.) Hook. et Arn.

Decreto 284: Declara zona de catástrofe a las comunas de las regiones de Coquimbo y Valparaíso que indica. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 22 de septiembre del 2022.

Díaz-Vaz, J. (1979). Claves para la identificación de maderas de árboles nativos y cultivados en Chile. *Bosque*, 3(1), 15-25.

Donoso, C. (1974). *Dendrología: Árboles y Arbustos Chilenos*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago, Chile. 72 p.

Donoso, C. (1981). *Ecología Forestal: El Bosque y su Medio Ambiente*. Santiago, Chile. Editorial Universitaria.

Espinosa, M., Castro, R., & Sumpsi i Riera, C. (2008). Evaluación ambiental de plantaciones de paltos en laderas: Cuenca del río Petorca, Región de Valparaíso, Chile.

Ferrero, M. E., Villalba, R., & Rivera, S. M. (2014). An assessment of growth ring identification in subtropical forests from northwestern Argentina. *Dendrochronologia*, 32(2), 113-119.

Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N. G., Ramdane, A., & Cescatti, A. (2022). Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, 608(7923), 534-539.

Gajardo Michell, R. (1983). *Sistema básico de clasificación de la vegetación nativa chilena*.

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.

Gillett, N. P., Kell, T. D., & Jones, P. (2006). Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, 33(23).

Gong, D., & Wang, S. (1999). Definition of Antarctic Oscillation index. *Geophysical Research Letters*, 26(4), 459-462.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999GL900003>

González - Reyes Á. (2020). KLIMA_trees. GitHub.
https://github.com/lonkotrewa/KLIMA_trees

González-Reyes, Á., Jacques-Coper, M., Bravo, C., Rojas, M., & Garreaud, R. (2023). Evolution of heatwaves in Chile since 1980. *Weather and Climate Extremes*, 100588.

Guibal, F., & Guiot, J. (2021). Dendrochronology. *Paleoclimatology*, 117-122. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3_8

Gutiérrez, E.M (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. X. Nieto & MA Cau, *Arqueología náutica mediterránea*, 309-322.

Gutiérrez.A.G, Barbosa. O., Christie. D.A., Del-Val. E., Ewing. H.A., Jones. C.G., Marquet. A., Weathers. K.C., Armesto. J.J. (2008). Patrones de regeneración y persistencia del bosque de Fray Jorge dependiente de la niebla en el Chile semiárido durante los últimos dos siglos. *Biología del cambio global*, 1(4), 161-176.

Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *43*, 51-67.

Jaksic, F. M. (2001). Spatiotemporal variation patterns of plants and animals in San Carlos de Apoquindo, central Chile. *Revista Chilena de la Historia Natural*, 74(2), 477-502.

Lara, A., Aravena, J. C., & Villalba, R. (1994). Alerces, testigos milenarios del clima planetario. *Ambiente y Desarrollo*, 10(4), 71-78.

Lara, A., Villalba, R., Aravena, J. C., Wolodarsky, A., & Neira, E. (2000). Desarrollo de una red de cronologías de *Fitzroya cupressoides* (Alerce) para Chile y Argentina. *Dendrochronologia en America Latina*, edited by: Roig, F., Mendoza, *Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina*, 217-244.

Le Quesne. C., Stahle. D., Cleaveland. M., Therrell. M., Aravena. JC., Barichivich. J. (2006). Cronologías de anillos de árboles antiguos de *Austrocedrus* utilizadas para reconstruir la variabilidad de las precipitaciones en el centro de Chile desde el 1200 al 2000 d.C.. *Journal of Climate*, 19(22), 5731-5744.

Lemenkova, P. (2022). Mapeo de parámetros climáticos en el territorio de Botswana utilizando GMT y datos de superficie cuadrículados de TerraClimate. *Revista internacional de información geográfica de ISPRS*. 11(9), 473.

Ley N° 20.283. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 11 de julio de 2008.

Lisi, C. S., Fo, M. T., Botosso, P. C., Roig, F. A., Maria, V. R., Ferreira-Fedele, L., & Voigt, A. R. (2008). Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in southeast Brazil. *Iawa Journal*, 29(2), 189-207.

Luebert, F., & Plischoff, P. (2012). Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Investigaciones Geográficas: Una Mirada Desde El Sur*, (44), Pág. 41–56. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2012.26408>

Luebert, F., Fuentes-Castillo, T., Plischoff, P., García, N., Román, M. J., Vera, D., & Scherson, R. A. (2022). Geographic patterns of vascular plant diversity and endemism using different taxonomic and spatial units. *Diversity*, 14(4), 271.

Marshall, G. J. (2003). Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses. *Journal of Climate*, 16(24), 4134-4143.

McDowell, N. G., & Allen, C. D. (2015). Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change*, 5(7), 669-672.

McDowell, N. G., Allen, C. D., Anderson-Teixeira, K., Aukema, B. H., Bond-Lamberty, B., Chini, L., Clark, J. S., Dietze, M., Grossiord, C., & Hanbury-Brown, A. (2020). Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 368(6494).

Miranda, A., Syphard, A. D., Berdugo, M., Carrasco, J., Gómez-González, S., Ovalle, J. F., Delpiano, C. A., Vargas, S., Squeo, F. A., & Miranda, M. D. (2023). Widespread synchronous decline of Mediterranean-type forest driven by accelerated aridity. *Nature Plants*, 9(11), 1810-1817.

Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, 16(2), 281-296.

Müller, B. S. (1999). Evaluación de la cuenca del río Pedernal en función de su utilización agrícola sustentable, en base a parámetros geográfico-físico, en la comuna de Petorca, quinta región.

Muñoz, A. A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garreton, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J. A., Chávez, R. O., Barría, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M., & LeQuesne, C. (2020). Water Crisis in Petorca Basin, Chile: The Combined Effects of a Mega-Drought and Water Management. *Water*, 12(3), 648. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/648>

NOAA. Oportunidades para estudiantes en el AOML. Sitio web del Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico, <https://oceanservice.noaa.gov/podcast/july17/nop08-historical-maps-charts.html>, consultado el 13/11/23

Ovejero, D. P., & Leónidas, M. J. (2016) TENDENCIAS EN LOS INDICES DE SEQUIA PARA LA REGION SUBTROPICAL DE LA TIERRA.

Panez-Pinto, A., Mansilla-Quiñones, P., & Moreira-Muñoz, A. (2018). Agua, tierra y fractura sociometabólica del agronegocio. *Actividad frutícola en Petorca, Chile. Bitácora Urbano Territorial*, 28(3), 153-160.

Ramírez, J. A., & del Valle, J. I. (2011). Paleoclima de La Guajira, Colombia; según los anillos de crecimiento de *Capparis odoratissima* (Capparidaceae). *Revista de biología tropical*, 59(3), 1389-1405.

Ramírez-Martínez, M., Terrazas, T., Aguilar-Rodríguez, S., & Martínez-Ávalos, J. G. (2017). Anatomía de la madera de especies de la selva baja caducifolia de Tamaulipas, México. *Madera y bosques*, 23(2), 21-41.

Retamal, H., y Morales, N. (2022). Árboles de Chile: Taxonomía, ecología y conservación de todas las especies arbóreas nativas de Chile. *Bosque chileno*. Primera edición, 324p.

Reyes Calvo, G., & Zamora Gatica, G. (2009). Estudio agrológico V Región: descripciones de suelos, materiales y símbolos. Actualización 2009. (Pub. CIREN N° 116).

Rodríguez Ríos, R., Matthei, S., & Quezada, M. (1983). Flora arbórea de Chile. Editorial de la Universidad de Concepción. Chile. 408 p.

Sage, R. F. (2020). Global change biology: a primer. *Global Change Biology*, 26(1), 3-30.

Salazar, N. (2013). Actualización informe evaluación de los recursos hídricos superficiales de las cuencas del río Petorca y río La Ligua, Región de Valparaíso.

Santini, L., Craven, D., Rodriguez, D. R. O., Quintilhan, M. T., Gibson-Carpintero, S., Torres, C. A., Roig, F. A., Muñoz, A. A., & Venegas-Gonzalez, A. (2024) Extreme drought triggers parallel shifts in wood anatomical and physiological traits in upper treeline of the Mediterranean Andes. *Ecological Processes*, 13(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00486-9>

Sarricolea, P., & Meseguer-Ruiz, O. (2015). Sequías en Chile central a partir de diferentes índices en el período 1981-2010. *Investigaciones Geográficas*, (50), 19-32.

SASS, J.E. (1951). Botanical microtechnique. 2nd ed. Iowa: State College Press. 228p.

Schulman, E. (1956). Dendroclimatic changes in semiarid America (U. o. A. Press, Ed.).

Seager, R., Osborn, T. J., Kushnir, Y., Simpson, I. R., Nakamura, J., & Liu, H. (2019). Climate variability and change of Mediterranean-type climates. *Journal of Climate*, 32(10), 2887-2915.

Speer, J. H. (2010). Fundamentals of Tree-ring Research. University of Arizona Press, Tucson.

Stokes, M. A. (1996). An introduction to tree-ring dating. University of Arizona Press.

Teneb, E. A., Cavieres, L. A., Parra, M. J., & MARTICORENA, A. (2004). Patrones geográficos de distribución de árboles y arbustos en la zona de transición climática mediterráneo-templada de Chile. *Revista chilena de historia natural*, 77(1), 51-71.

Valencia, F. T. (2019). Regulación de la sequía en Chile: análisis normativo de la declaración de escasez. *Revista de Derecho Administrativo Económico*. (29), 117-138.

Venegas-González, A., Juñent, F. R., Gutiérrez, A. G., & Peña-Rojas, K. (2018). Efecto de la variabilidad climática sobre los patrones de crecimiento y

establecimiento de *Nothofagus macrocarpa* en Chile central. *Bosque (valdivia)*, 39(1), 81-93. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002018000100081>

Venegas-González, A., Muñoz, A. A., Carpintero-Gibson, S., González-Reyes, A., Schneider, I., Gípolou-Zuñiga, T., Aguilera-Betti, I., & Roig, F. (2023). Sclerophyllous forest tree growth under the influence of a historic megadrought in the mediterranean ecoregion of Chile. *Ecosystems*, 26(2), 344-361.

Villalba R., Villagra P.E., Boninsegna J.A., Morales M.S., Moyano V. (2000). Dendroecología y dendroclimatología con especies del género *Prosopis* en Argentina. *Multequina*, 9(2),1-18

Villalba, R. (2007). Tree-ring evidence for tropical-extratropical influences on climate variability along the Andes in South America. *Pages News*, 15(2), 23-25.

Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(2), 201-213.

Yuan, X., & Li, C. (2008). Climate modes in southern high latitudes and their impacts on Antarctic sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C6).

Zambrano, F., Vrieling, A., Nelson, A., Meroni, M., & Tadesse, T. (2018). Prediction of drought-induced reduction of agricultural productivity in Chile from MODIS, rainfall estimates, and climate oscillation indices. *Remote sensing of environment*, 219, 15-30.

Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431-436.