

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO DE DOS ARBUSTOS QUE COEXISTEN EN ÁREAS DESÉRTICAS DE MONTAÑA DEL CENTRO-OESTE DE ARGENTINA

Edgardo A. Melián^{1,*} , Martín A. Hadad¹ , Daniel Flores¹ , Verónica Gallardo¹ ,
Yanina A. Ribas Fernández¹ , Evangelina Romero¹  & Fidel A. Roig^{2,3} 

¹ Laboratorio de Dendrocronología de Zonas Áridas, CIGEOBIO (CONICET-UNSJ); Gabinete de Geología Ambiental (INGEO-UNSJ), Av. José Ignacio de la Roza Oeste 590, J5402DCS Rivadavia, San Juan; Argentina;

*edgardomelian@unsj-cuim.edu.ar (author for correspondence).

² Laboratorio de Dendrocronología e Historia Ambiental, IANIGLA- CONICET-Universidad Nacional de Cuyo, Av. Ruiz Leal s/n - Parque Gral. San Martín, M5500 Mendoza, Argentina.

³ Hémera Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Camino La Pirámide 5750, Huechuraba, Santiago 8580745, Chile.

Abstract. Melián, E. A.; M. A. Hadad, D. Flores, V. Gallardo, Y. A. Ribas Fernández, E. Romero & F. A. Roig, 2024. Assessment of dendrochronological potential of two shrubs that coexist in mountain desert areas of central-western Argentina. *Darwiniana*, nueva serie 12(1): 107-121.

Dendrochronological studies with shrubs from arid ecosystems in South America are of great importance due to the scarcity of ecological information that exists in these environments. This approach allows to evaluate the responses of plant species exposed to climate variability under arid conditions. We developed ring width chronologies and evaluated, for the first time for Argentina, the relationship between radial growth and climatic variables (precipitation, temperature and aridity index) of two shrub species characteristic of arid montane environments, *Proustia cuneifolia* and *Hualania collettioides*. The chronology of *P. cuneifolia* recorded a positive correlation with precipitation (May), temperature (October, July and February), and SPEI (June-October). The chronology of *H. collettioides* showed negative correlation with the temperature of the months of December and February. The results suggest that variations of the annual ring widths of *P. cuneifolia* are influenced by regional climate, mainly by aridity, while the growth of *H. collettioides* could be influenced by factors at the scale of microsite. A more extensive network of chronologies is necessary to explore site-climate variability under conditions of a complex topography such as that found in mountainous areas, suggesting the spatial extension of these records in order to understand in more detail the climatic imprint on the annual growth of these shrubs.

Keywords. Dendroclimatology; shrubs; radial growth; semiarid environment; weather.

Resumen. Melián, E. A.; M. A. Hadad, D. Flores, V. Gallardo, Y. A. Ribas Fernández, E. Romero & F. A. Roig, 2024. Evaluación del potencial dendrocronológico de dos arbustos que coexisten en áreas desérticas de montaña del centro-oeste de Argentina. *Darwiniana*, nueva serie 12(1): 107-121.

Los estudios dendrocronológicos con arbustos de ecosistemas áridos en América del Sur son de gran importancia para interpretar la ecología de estos ambientes debido a la escasez de estudios en la región. Este enfoque permite evaluar las respuestas de las poblaciones vegetales expuestas a las condiciones del clima árido. Desarrollamos cronologías de ancho de anillos y evaluamos, por primera vez para Argentina, la relación entre el crecimiento radial y variables climáticas (precipitación, temperatura e índice de aridez) de dos especies de arbustos característicos de ambientes montañosos, *Proustia cuneifolia* y *Hualania collettioides*. La cronología de *P. cuneifolia* registró una correlación positiva con la precipitación (mayo), temperatura (octubre, julio y febrero) y SPEI (junio-octubre). La cronología de *H. collettioides* presentó relaciones negativas con la temperatura de los meses de diciembre y febrero. Los resultados sugieren que las variaciones en el ancho de los anillos anuales de *P. cuneifolia* están influenciadas por el clima regional, principalmente por la aridez, mientras

que el crecimiento de *H. colletioides* podría estar influenciado por factores a escala de micrositio. La intrincada orografía cordillerana genera variaciones en las condiciones climáticas, las cuales pueden imprimir respuestas particulares del crecimiento. Por ello, una red de cronologías ayudaría a interpretar en detalle la respuesta del crecimiento de estas plantas al clima cordillerano.

Palabras clave. Ambiente semiárido; arbusto; dendroclimatología; clima; crecimiento radial.

INTRODUCCIÓN

Las plantas leñosas son reconocidas por su capacidad de registrar en sus anillos de crecimiento las condiciones climáticas estacionales de los ecosistemas en que se desarrollan (Fritts, 1976; Melián et al., 2023). En América del Sur, los registros de anillos de árboles han tenido un mayor desarrollo en regiones templado-frías y subtropicales / tropicales que en latitudes medias (Aguilera-Betti et al., 2020) debido parcialmente a la escasez de especies arbóreas. Sin embargo, los ecosistemas del desierto y semidesierto del centro-oeste de Argentina han sido objeto de algunos estudios dendroclimáticos y dendroecológicos mediante el empleo de arbustos (Roig, 1986; Roig & Boninsegna, 1990; Hadad et al., 2022) y árboles (Villalba & Boninsegna, 1989; Villalba et al., 2000; Giantomasi et al., 2009; Piraino et al., 2017). Sin embargo, el conocimiento sobre la respuesta dendroclimática de los arbustos xerófitos de las regiones áridas y semiáridas del centro-oeste de Argentina posee aún escasos antecedentes. Estudios recientes indican el gran potencial que poseen los arbustos para extraer información dendroecológica y dendroclimática, sobre todo en grandes áreas del planeta donde la cobertura vegetal se restringe solo a esta bioforma (Myers-Smith et al., 2015; Camarero et al., 2021; Requena-Rojas et al., 2021). Por ello, los estudios dendroclimatológicos con arbustos toman relevancia en ambientes carentes de árboles, permitiendo realizar reconstrucciones climáticas que se extiendan más allá de los registros instrumentales del clima (Lu et al., 2021; Panthi et al., 2021).

El crecimiento de las plantas en ambientes áridos está condicionado principalmente por la disponibilidad de agua, pudiendo evaluarse a través de índices de sequía. La sequía es un fenómeno climático complejo que involucra diferentes variables climáticas como temperatura, precipitación, evapotranspiración, y puede describirse mediante varios tipos de índices. Entre ellos, el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (en adelante SPEI, por sus siglas en inglés), es un índice de sequía multiescalar que puede ser evaluado a distintas escalas de tiempo, por ej:

3, 6, 12 meses. Este índice se basa en datos climáticos y permite detectar, monitorear y analizar eventos de sequía (Vicente-Serrano et al., 2010). La comparación entre anillos de crecimiento y SPEI ha sido muy utilizada para estudiar la dinámica del crecimiento en relación con sequías que afectan a diferentes especies de árboles y arbustos (Jiang et al., 2016; Chen et al., 2016; Tejedor et al., 2017; Bhandari et al., 2019; Hadad et al., 2021; 2022).

En los desiertos y semidesiertos del centro de Argentina, las bajas precipitaciones (entre 30 y 350 mm al año) inciden en escasos valores de cobertura vegetal, aunque esto varía tanto a escala regional como local (Bisigato et al., 2009). En cauces temporales, donde puede encontrarse mayor humedad de suelos que en situaciones de laderas con pronunciada pendiente, es factible que se desarrollen dos especies de arbustos: *Proustia cuneifolia* D. Don (Asteraceae) y *Hualania colletioides* Phil. (Polygalaceae). *Proustia cuneifolia*, llamada comúnmente “altepe”, es un arbusto perenne caducifolio y multifustal que crece entre los 1500 y 3000 m s.m. (Kiesling, 2013). *Hualania colletioides*, es un arbusto perenne áfilo con tallo fotosintético que se distribuye en el centro-oeste de la Argentina, en quebradas y márgenes de ríos de zonas muy secas, entre los 1000 y 2000 m s.m. (Kiesling, 2003). Aunque actualmente no existen en Argentina estudios dendroclimáticos con ninguna de estas dos especies, se ha reportado una cronología de ancho de anillos de *P. cuneifolia* en el sector occidental de la cordillera de los Andes Centrales en Chile, donde el crecimiento es controlado por la precipitación de invierno y la temperatura de los meses de abril a septiembre (Barichivich et al., 2009). Además, se registró que el crecimiento de estas poblaciones está fuertemente modulado por las condiciones climáticas del Pacífico Central, en particular relacionado a años El Niño.

Resulta de gran importancia desarrollar cronologías de ancho de anillos de arbustos en ecosistemas donde constituyen el principal componente de la vegetación, a fin de identificar su respuesta a los factores ambientales modificados producto del actual cambio climático. Esta información puede ser de utilidad para predecir la respuesta de poblaciones de especies leñosas

a los incrementos de temperatura y escasez de agua en suelos. Los objetivos de este trabajo son: 1) analizar el potencial dendrocronológico de *P. cuneifolia* y *H. collettioides*, dos especies de arbustos que coexisten en un mismo ambiente; 2) analizar la respuesta del crecimiento de estos arbustos a variables climáticas y 3) estudiar la estabilidad temporal de la relación climacrecimiento de ambas cronologías para las últimas décadas. La hipótesis de este trabajo plantea que las especies estudiadas responderán de manera diferente (distinta sensibilidad) frente a las variables climáticas, debido a que poseen distintas estrategias ecológicas (*P. cuneifolia* es un arbusto caducifolio y *H. collettioides* un arbusto áfilo de tallos fotosintetizantes). Estos estudios son inéditos para estas especies y para la región, por lo que este trabajo contribuirá a una mejor comprensión de los aspectos ecológicos en sistemas cordilleranos, en un contexto de cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el Valle de Pedernal, al Sur de la Provincia de San Juan, Argentina (Fig. 1). El Valle de Pedernal fue declarado área protegida en el año 2000 para la conservación de las características naturales y la preservación del hábitat de especies silvestres (Ley provincial N° 7028). La temperatura media anual es de 15,4 °C, con las temperaturas promedio más bajas para el mes de julio (7,7 °C), mientras que las temperaturas promedio más altas se registran en el mes de enero (23,3 °C). La precipitación es predominantemente de tipo estival, con un promedio anual de 129 mm (Fig. 2). Los datos climáticos fueron obtenidos utilizando cuadrículas con resolución espacial de 0,5° × 0,5° alojados en la base de datos del CRU (*Climatic Research Unit*, TS 4.01; Harris et al., 2020) para el periodo 1901-2019.

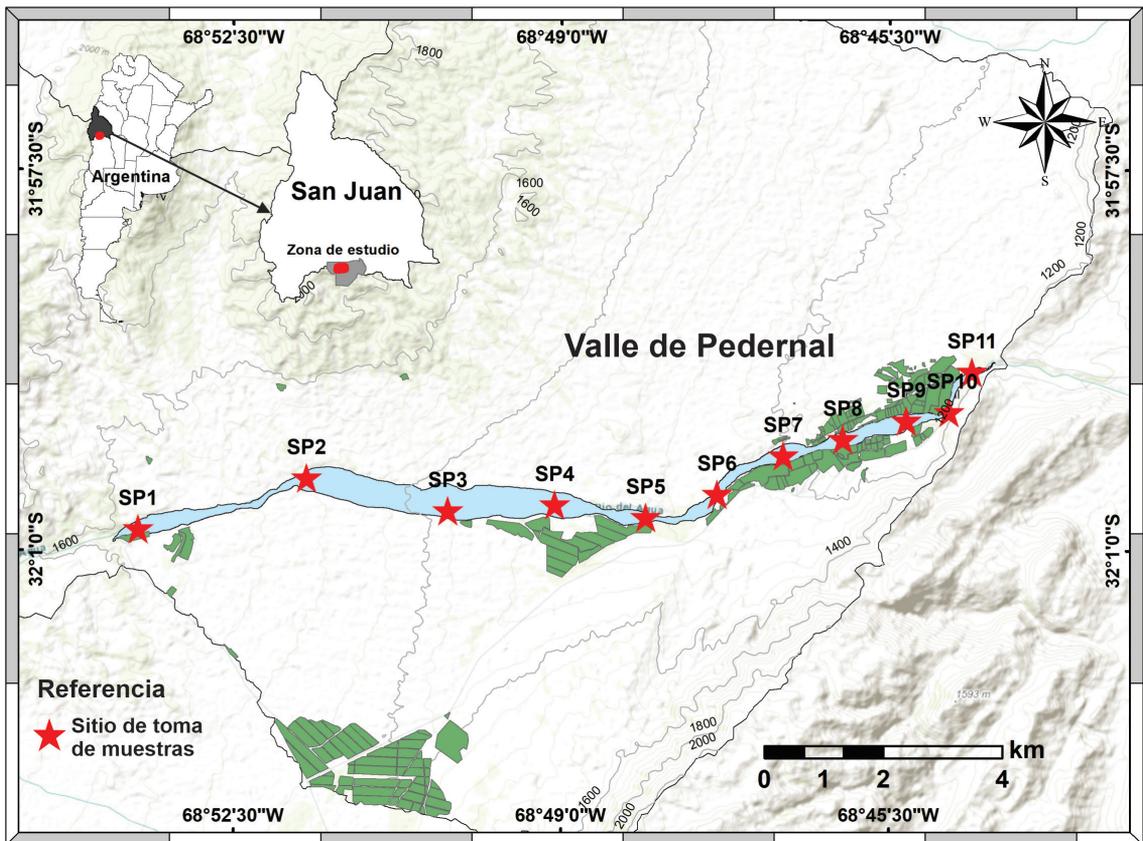


Fig. 1. Mapa del área de estudio en la localidad de Pedernal al sur de la provincia de San Juan, Argentina. Las estrellas rojas representan los puntos donde aleatoriamente se tomaron las muestras de los arbustos, dentro del cauce del río del Agua.

La cordillera de los Andes y las Sierras del Tontal son determinantes de las condiciones meteorológicas del Valle de Pedernal. Esto explica la influencia de los anticiclones de los océanos Pacífico y Atlántico. Los centros de alta presión se manifiestan cálidos con baja humedad específica, resultando un clima seco continental con marcada amplitud térmica; mientras que los centros ciclónicos dan lugar a zonas de convergencia y ascenso de masas de aire húmedo precipitable (Minetti, 1986; Dalmaso et al., 2011). En cuanto a las comunidades vegetales, más del 80% corresponden a especies pertenecientes a la provincia fitogeográfica del Monte, mientras que las demás especies presentes, pertenecen a las provincias fitogeográficas del Cardonal, Puna y Altoandina (Dalmaso et al., 2011). El área de estudio presenta vegetación de tipo riparia, dominada por arbustos de tallos múltiples de *P. cuneifolia*, *H. colletioides*, *Larrea nítida* Cav., entre otras, y de árboles como *Neltuma flexuosa* (DC.) C.E. Hughes & G.P. Lewis y *N. chilensis* (Molina) C.E. Hughes & G.P. Lewis.

Colecta de material y trabajo de laboratorio

Se seleccionaron al azar arbustos adultos y sanos (mayores a 1,5 m de altura) de *P. cuneifolia* y *H. colletioides* (Figura 3A y B) en el cauce del río del Agua del Valle de Pedernal, a una altitud

de 1145 m. Al ser especies multifustales, se seleccionó un fuste para la extracción de muestra a fin de no dañar a las plantas. Se recolectaron muestras de 17 individuos de *P. cuneifolia* y 19 de *H. colletioides*. Las muestras fueron procesadas siguiendo las prácticas estándar de dendrocronología (Cook & Kairiukstis, 1990). El año calendario de crecimiento fue asignado acorde a la convención de Schulman (1956) para los registros de anillos de los árboles de América del Sur. Se midieron tres series por cada individuo. Los anillos fueron medidos con una precisión de 0,001 mm con el programa CooRecorder versión 9.8.1 (Larsson, 2014). La precisión de la datación de la serie temporal resultante del ancho del anillo se verificó dentro de los arbustos de cada especie, mediante la sincronización de patrones de anillos de crecimiento anchos y estrechos (fchado cruzado visual, Stokes & Smiley, 1968), y controlado estadísticamente mediante utilización del software COFECHA (Holmes, 1983).

Desarrollo de las cronologías de *P. cuneifolia* y *H. colletioides*

Las mediciones individuales de ancho de anillos fueron estandarizadas empleando la función exponencial negativa. Se seleccionó la cronología versión Standard para los posteriores análisis

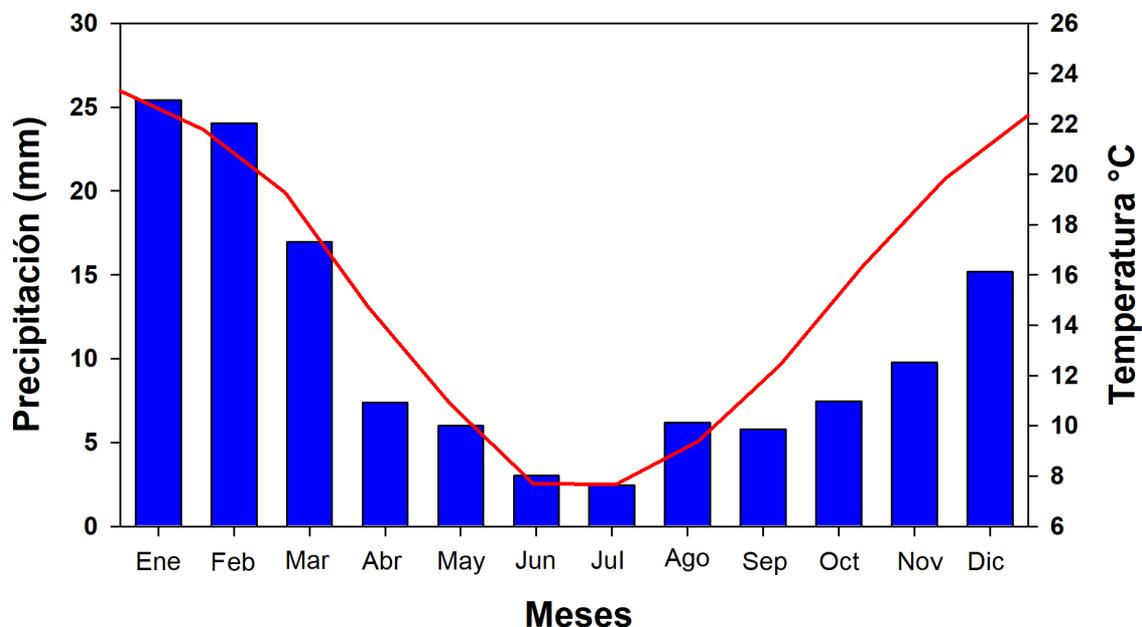


Fig. 2. Climatograma del área de estudio, mostrando la precipitación mensual (barras azules) y temperatura media mensual (línea roja) para el periodo 1901-2019. Los datos fueron obtenidos del Climate Explorer (<http://www.knmi.nl>; Trouet & van Oldenborgh, 2013).

climáticos. Se construyó una cronología de ancho de anillos para cada especie y la calidad de las mismas fue evaluada con base en el cálculo de los siguientes estadísticos: sensibilidad media (SM), desviación estándar (DS), correlación media entre las series de ancho de anillos (RBAR) y señal de expresión de población (EPS). El estadístico RBAR es una correlación promedio de todas las series, la cual es una expresión del porcentaje de varianza en común. RBAR puede cambiar con el tiempo como consecuencia del cambio de la fuerza de la señal, lo que puede ser causado por la diferencia en el número de series a lo largo del tiempo. Por otro lado, con el estadístico EPS se estima qué tan bien se compara una cronología de muestra finita con una cronología de población teórica basada en un número infinito de árboles (Wigley et al., 1984). EPS depende en gran

medida del número de individuos utilizados en la construcción de la cronología. Un valor de EPS > 0,85 para las cronologías, indica una coherencia aceptable entre los patrones de crecimiento entre series. Se utilizó el paquete dplR (Bunn et al., 2019) para realizar la cronología y obtener los estadísticos.

Análisis de relación clima-crecimiento radial de *P. cuneifolia* y *H. colletioides*

Para analizar la relación clima-crecimiento, se comparó el crecimiento con la temperatura media mensual, la precipitación total mensual y con SPEI de 6 meses (SPEI-6), con condiciones secas correspondientes a valores SPEI negativos. Utilizamos el período de 6 meses para SPEI, porque se ha observado que es una de las ventanas de tiempo más relevantes, en el que se registran

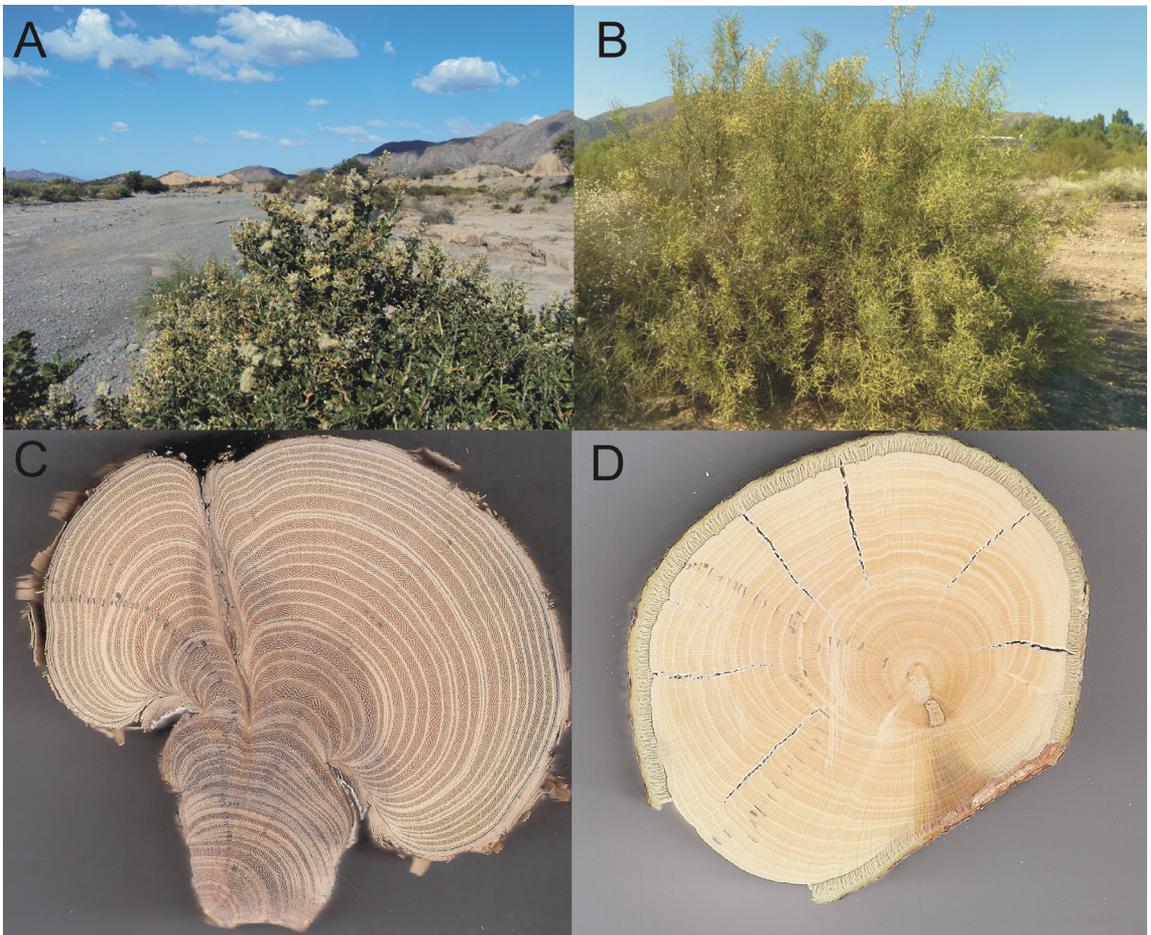


Fig. 3. Ejemplar de **A)** *Proustia cuneifolia*, **B)** *Hualania colletioides* en el cauce del río seco en el valle de Pedernal, San Juan, Argentina. Corte transversal donde se visualizan los anillos de crecimiento **C)** de *Proustia cuneifolia* y **D)** de *Hualania colletioides*. Fotos: Martín Hadad.

respuesta en el crecimiento tanto de árboles como de arbustos (Pasho et al., 2012; Peña-Gallardo et al., 2018; Camarero & Rubio-Cuadrado, 2020). Los datos climáticos utilizados constituyen un promedio del área entre las coordenadas 30-32° S y 68-69° O, con una resolución espacial de 0,5° × 0,5°. Para determinar la relación clima-crecimiento radial de ambas especies se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, con una significancia estadística de $p < 0,05$ (Blasing et al., 1984). Mediante este análisis, se identifican los principales factores climáticos que inciden en el crecimiento, así como la estacionalidad y la fuerza de la respuesta climática (Fritts, 1976). Debido a que las condiciones climáticas de los periodos de crecimiento anteriores pueden influir en el crecimiento actual, se realizaron correlaciones para cada mes y durante un periodo de 20 meses, para abarcar dos temporadas de crecimiento (periodo previo y corriente). Para estudiar la estabilidad temporal de la relación clima-crecimiento de ambas cronologías se realizaron correlaciones móviles basadas en ventanas de 21 años con un rezago de 5 años. Los coeficientes de correlación y correlaciones móviles se estimaron utilizando el paquete Treeclim (Zang & Biondi, 2015). Todos los análisis se realizaron mediante el programa estadístico R (R Core Team, 2018).

Para identificar influencias regionales de las condiciones de humedad, se realizaron análisis de correlación espacial de ambas cronologías con SPEI-6 con una resolución espacial de 0,5° × 0,5°. La correlación espacial se realizó mediante KNMI Climate Explorer (Trouet & Oldenborgh, 2013; <http://climexp.knmi.nl/>) y los coeficientes de correlación significativos estuvieron representados en el campo ($p < 0,05$).

RESULTADOS

Cronologías de ancho de anillos de *P. cuneifolia* y *H. colletioides*

La anatomía de los anillos de crecimiento de ambas especies permitió identificarlos a simple vista (Fig. 3C y D). La correlación entre todas las series analizadas (intercorrelación) para *P. cuneifolia* fue de 0,47 ($p < 0,01$), mientras que para *H. colletioides* fue de 0,42 ($p < 0,01$). La extensión de la cronología de *P. cuneifolia* fue de 65 años (1953-2017, [EPS] = 0,94), mientras que la extensión de la cronología de *H. colletioides* fue de 40 años (1976-2015, [EPS] = 0,93). Los valores de EPS indican buenas posibilidades de identificar la incidencia de una señal ambiental común en estas cronologías (Fig. 4, Tabla 1).

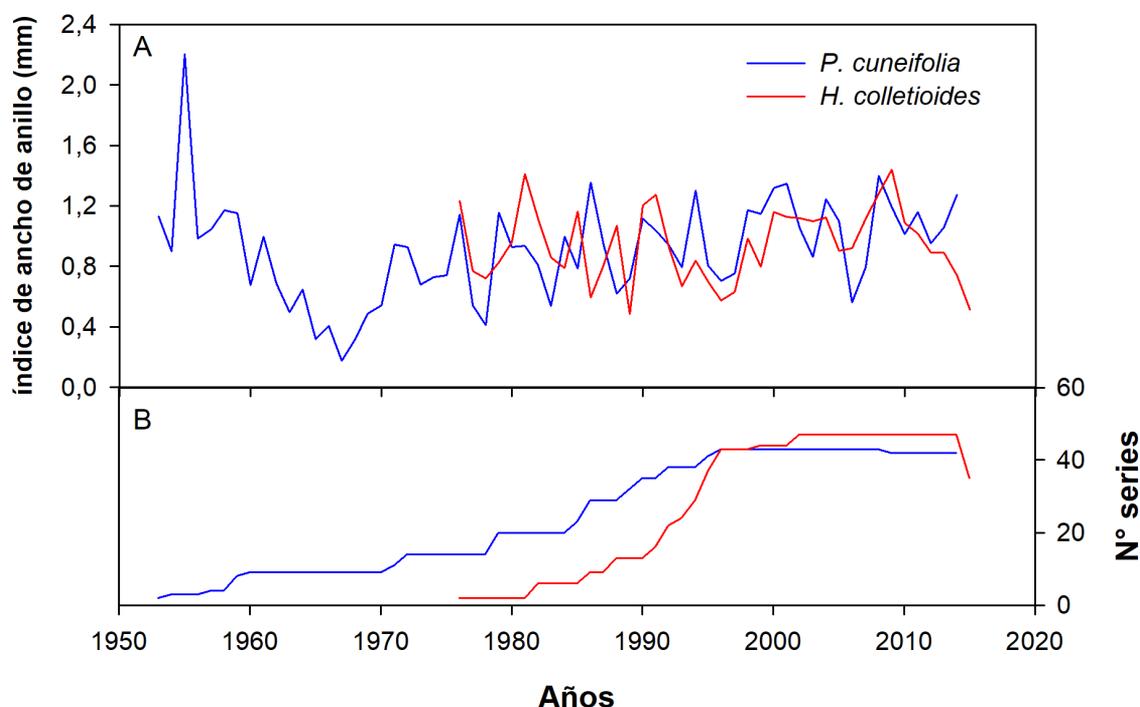


Fig. 4. A, Cronología de ancho de anillo de *Proustia cuneifolia* (línea azul) y de *Hualania colletioides* (línea roja). B, Número de series para *Proustia cuneifolia* (línea azul) y de *Hualania colletioides* (línea roja).

Tabla 1. Estadísticos de las cronologías de ancho de anillos de *Proustia cuneifolia* y *Hualania collettioides*. SM: sensibilidad media, DS: desvío estándar, RBAR: correlación media entre las series de ancho de anillo, EPS: señal de expresión de población, Número de muestras recolectadas por individuos de cada especie y número de series analizadas para realizar las cronologías.

Especie	Período	Intercorrelación	Media de ancho de anillo (mm)	SM	DS	RBAR	EPS	Nº de individuos/series
<i>Proustia cuneifolia</i>	1953-2017	0,47 (p<0,05)	0,92	0,31	0,32	0,25	0,94	17/43
<i>Hualania collettioides</i>	1976-2015	0,42 (p<0,05)	0,95	0,38	0,55	0,35	0,93	19/47

Relación clima-crecimiento radial de *P. cuneifolia* y *H. collettioides*

Cuando se compararon las cronologías con la precipitación mensual, se observó una correlación positiva y significativa para el mes de mayo en *P. cuneifolia* ($r = 0,34$; $p < 0,05$) durante el periodo previo de crecimiento (Fig. 5A). En el caso de *H. collettioides* no se observó ninguna relación significativa. Cuando se comparó la cronología del ancho de los anillos de *P. cuneifolia* con la temperatura media mensual, se observó una correlación positiva y significativa ($r = 0,23$; $p < 0,05$) para el mes de octubre del periodo previo de crecimiento. Además, se observó una relación positiva y significativa ($r = 0,23$; $p < 0,05$) con el mes de agosto del periodo inactivo de crecimiento. Mientras que a finales del periodo corriente de crecimiento se observó una relación positiva y significativa ($r = 0,43$; $p < 0,05$) con el mes de marzo (Fig. 5B). En el caso de *H. collettioides* se observó una correlación negativa y significativa ($r = -0,28$; $p < 0,05$) en el mes de diciembre del periodo previo de crecimiento y una relación positiva y significativa ($r = 0,29$; $p < 0,05$) con el mes de febrero del periodo corriente de crecimiento (Fig. 5B). Cuando se compararon las cronologías de ancho de anillos de ambas especies con el índice SPEI-6, se observó en *P. cuneifolia* una relación positiva y significativa ($p < 0,05$) para los meses de junio ($r = 0,26$), julio ($r = 0,38$), agosto ($r = 0,30$), septiembre ($r = 0,25$) y octubre ($r = 0,28$). No se observó ninguna relación significativa entre la cronología de *H. collettioides* y SPEI-6 (Fig. 6).

Las relaciones de las cronologías de ancho de anillos de estos arbustos no presentan una estabilidad en el tiempo analizado. Los resultados más relevantes están relacionados con las respuestas para el crecimiento previo en *P. cuneifolia*, donde se observa una relación positiva y significativa ($p < 0,05$) entre el crecimiento radial y la precipitación para el mes de febrero del periodo 1962-1997 (Fig. 7A). En el caso de *H. collettioides* se registró una relación positiva y significativa ($p < 0,05$) entre el crecimiento y precipitación de octubre para el periodo 1980-2000 (Fig. 7B). Cuando se analizaron las cronologías

de ancho de anillo con la temperatura, se observó que *P. cuneifolia* registró una relación negativa y significativa ($p < 0,05$) en los meses de noviembre y marzo para los periodos 1987-2007 y 1982-2002, respectivamente. También se observó que, en el mes de marzo del periodo de crecimiento corriente, la relación fue positiva para todo el periodo analizado, y significativa ($p < 0,05$) entre 1967 y 1997 (Fig. 7C). En *H. collettioides* durante el periodo previo de crecimiento, se observó una relación negativa y significativa ($p < 0,05$) en diciembre para los periodos 1980-2005 y 1995-2015. En el periodo corriente de crecimiento se observó una relación positiva y significativa ($p < 0,05$) en los meses de febrero y marzo para el periodo 1990-2010 (Fig. 7D). Al comparar las cronologías de ancho de anillos con SPEI-6, observamos que *P. cuneifolia* mostró una relación positiva y significativa ($p < 0,05$) en los meses de otoño e invierno y comienzo de primavera, en particular entre los años 1987-2007 (Fig. 7E). Por otra parte, para *H. collettioides*, se observó para el periodo de crecimiento corriente, desde la década de 1990, una tendencia a una relación negativa entre el crecimiento radial y SPEI-6 (Fig. 7F) sin llegar a ser significativa.

La correlación espacial entre la cronología de ancho de anillos de *P. cuneifolia* y SPEI-6 para los meses de julio a octubre en la región de estudio fue positiva y significativa ($p < 0,05$) y extiende esta relación a una importante porción de la diagonal árida de Argentina (Fig. 8). Por otro lado, *H. collettioides*, no registró correlación espacial significativa entre su cronología de ancho de anillos y SPEI-6 ($p > 0,05$).

DISCUSIÓN

Cronologías de ancho de anillos de *P. cuneifolia* y *H. collettioides*

Se utilizaron por primera vez series de anillos de dos arbustos (*P. cuneifolia* y *H. collettioides*) creciendo en el Valle de Pedernal, lo que posibilitó identificar su potencial dendrocronológico. Las regiones áridas y semiáridas del centro-oeste de Argentina constituyen actualmente un vacío

en la red de estudios dendrocronológicos de Sudamérica, ya que solo se han reportado algunas cronologías de ancho de anillos de arbustos para la región precordillerana (Roig & Boninsegna, 1990; Hadad et al., 2022). En este trabajo presentamos la primera cronología de ancho de anillos de *P. cuneifolia* y *H. collettioides*, para Argentina, con una extensión de 65 años (1953-2017) y de 40 años (1976-2015), respectivamente. Hasta el momento sólo se había registrado una cronología de ancho de anillos de *P. cuneifolia* en la cordillera de los Andes de Chile, con una extensión de 126 años para el período 1879-2004 (Barichivich et al., 2009). Los resultados sugieren que ambas especies pueden ser útiles en estudios dendroecológicos y dendroclimáticos, desarrollando cronologías de ancho de anillos confiables que permiten identificar señales climáticas en sus anillos de crecimiento. Sin

embargo, la incidencia que imprime la compleja orografía cordillerana en las características del clima, podría influir en determinados patrones de respuesta de las plantas, por lo que es deseable expandir la red de cronologías de ancho de anillos a fin de realzar los aportes de estas especies en la comprensión de su ecología y en la reconstrucción de variables climáticas.

Correlaciones lineales entre clima y crecimiento radial de *P. cuneifolia* y *H. collettioides*

Alrededor del planeta, numerosos estudios en arbustos que coexisten en un mismo ambiente han demostrado que las respuestas en el crecimiento radial frente a las condiciones climáticas pueden ser especie-específicas (Young et al., 2016; Camarero et al., 2021; Senfeldt et al., 2021). En este trabajo registramos que dos especies

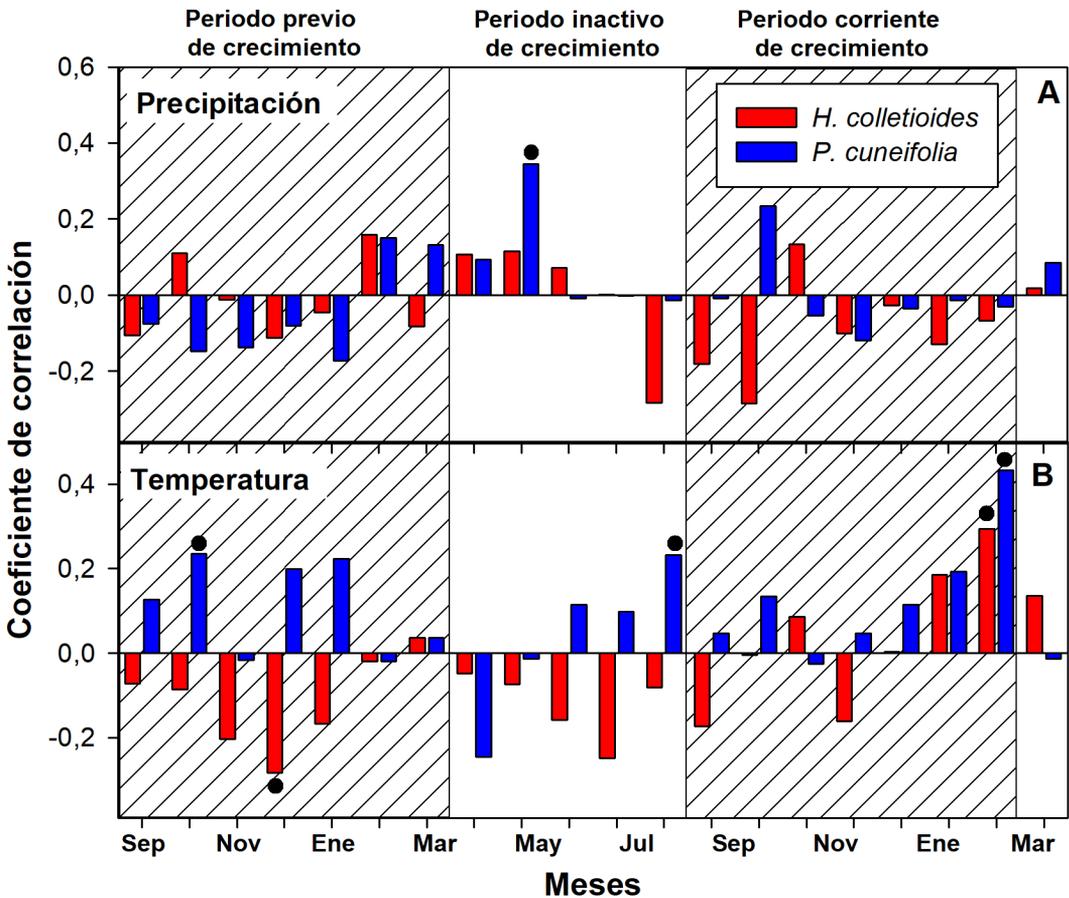


Fig. 5. Coeficiente de correlación de *Proustia cuneifolia* (barras azules) y *Hualania collettioides* (barras rojas) con **A)** Precipitación total mensual y con **B)** Temperatura media mensual. Los datos climáticos fueron obtenidos del Climate Explorer (<http://www.knmi.nl>). Los círculos negros denotan correlación significativa ($p < 0,05$).

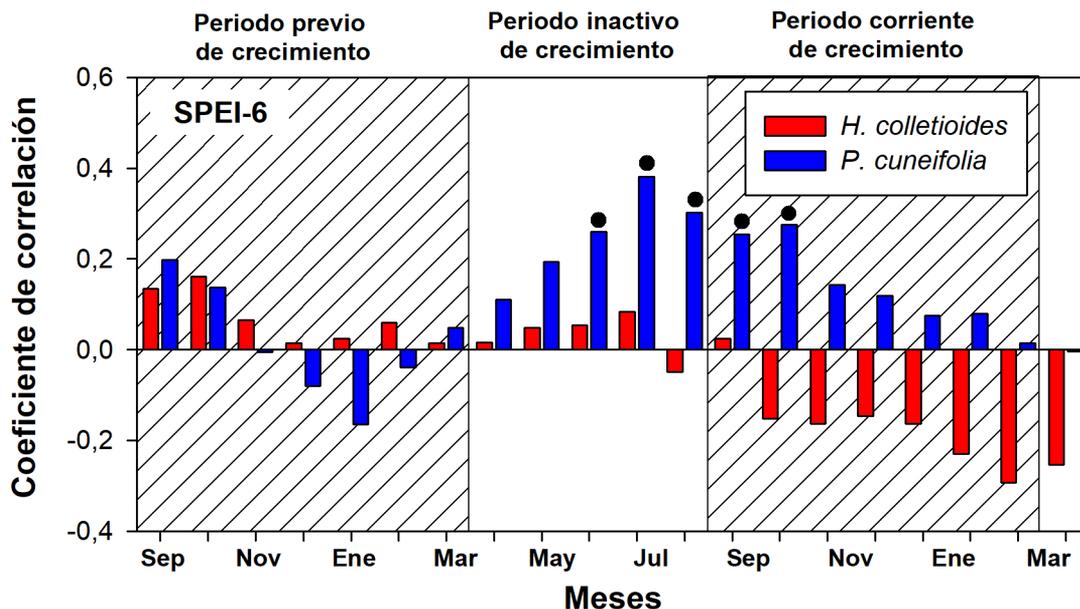


Fig. 6. Coeficiente de correlación de *Proustia cuneifolia* (barras azules) y *Hualania collettioides* (barras rojas) con SPEI-6, en el periodo 1970-2017. Los círculos negros denotan correlación significativa ($p < 0,05$). Los datos climáticos fueron obtenidos del Climate Explorer (<http://www.knmi.nl>).

características del Valle de Pedernal, que comparten los mismos ambientes, presentaron diferentes respuestas (algunas opuestas) en el crecimiento radial con relación a la temperatura, la precipitación y al índice de aridez SPEI-6. El efecto de la precipitación sobre el crecimiento radial fue débil y poco claro, presentando en general las dos especies tendencias a responder de manera negativa en los periodos previo y corriente de crecimiento. Si bien los veranos de la región son los que concentran la mayor cantidad de precipitaciones, éstas son escasas, aleatorias y débiles (Labraga & Villalba, 2009). Para el sector Central de Chile, Barichivich y colaboradores (2009), registraron para *P. cuneifolia* que en la estación de lluvias ocurría la máxima actividad en el cambium de esta especie, pero nuestros resultados no coinciden. Esta diferencia podría estar relacionada a que en la región cordillerana del centro-oeste de nuestro país, y a diferencia de Chile, las lluvias suceden principalmente en verano, precipitan sobre una superficie de suelo con temperaturas elevadas por radiación incidente, por lo que se produce evaporación, especialmente cuando llueve en forma de chubascos ligeros. Por tanto, las lluvias de verano podrían no ser muy efectivas para el crecimiento (Oladi et al., 2017).

En arbustos, generalmente es común registrar respuestas tanto positivas como negativas del crecimiento radial frente al incremento en las

temperaturas de verano (Blok et al., 2011; Dobbert et al., 2021), pero también se ha registrado que puede no haber respuesta significativa de ningún tipo (Hadad et al., 2022). En este trabajo *P. cuneifolia* presentó una respuesta positiva del crecimiento radial con la temperatura de verano para el período previo (enero) y corriente (marzo). Esto coincide con resultados registrados por Barichivich et al. (2009) para la especie, en los que las temperaturas de primavera-verano favorecen el crecimiento radial, sin embargo, la precipitación y menor evapotranspiración en invierno, son el principal control climático para el crecimiento radial de esta especie. Esto también podría estar relacionado con la respuesta del crecimiento registrada con relación al índice de aridez SPEI-6, la cual es positiva todo el invierno hasta fines de primavera. Esto puede deberse a que la seguridad hidráulica de la madera y su crecimiento asociado, está más relacionada a la demanda de evapotranspiración que a la humedad del suelo (Waite et al., 2023).

Correlaciones móviles y espacial entre clima y crecimiento radial de *P. cuneifolia* y *H. collettioides*

Al analizar las cronologías con las correlaciones móviles se vio una tendencia positiva y significativa del crecimiento de *P. cuneifolia* como respuesta a condiciones más

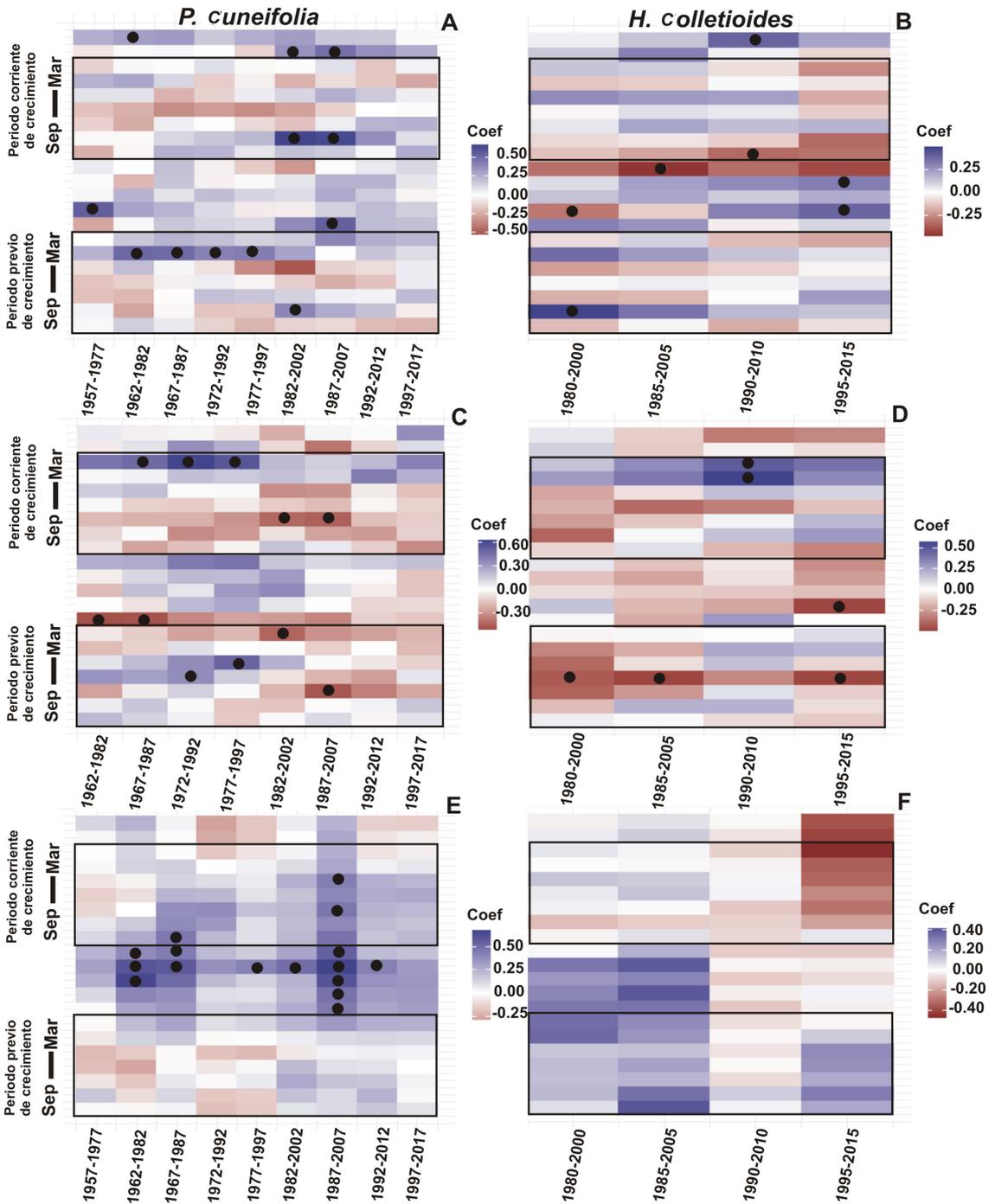


Fig. 7. Correlaciones móviles entre la cronología de *Proustia cuneifolia* (columna izquierda) y la cronología de *Hualania colletioides* (columna derecha) con Precipitación (A-B), Temperatura (C-D) y el índice de aridez SPEI-6 (E-F), respectivamente. Entre el periodo previo y corriente de crecimiento se encuentra el periodo inactivo de crecimiento. Los círculos negros denotan periodos significativos ($p < 0,05$).

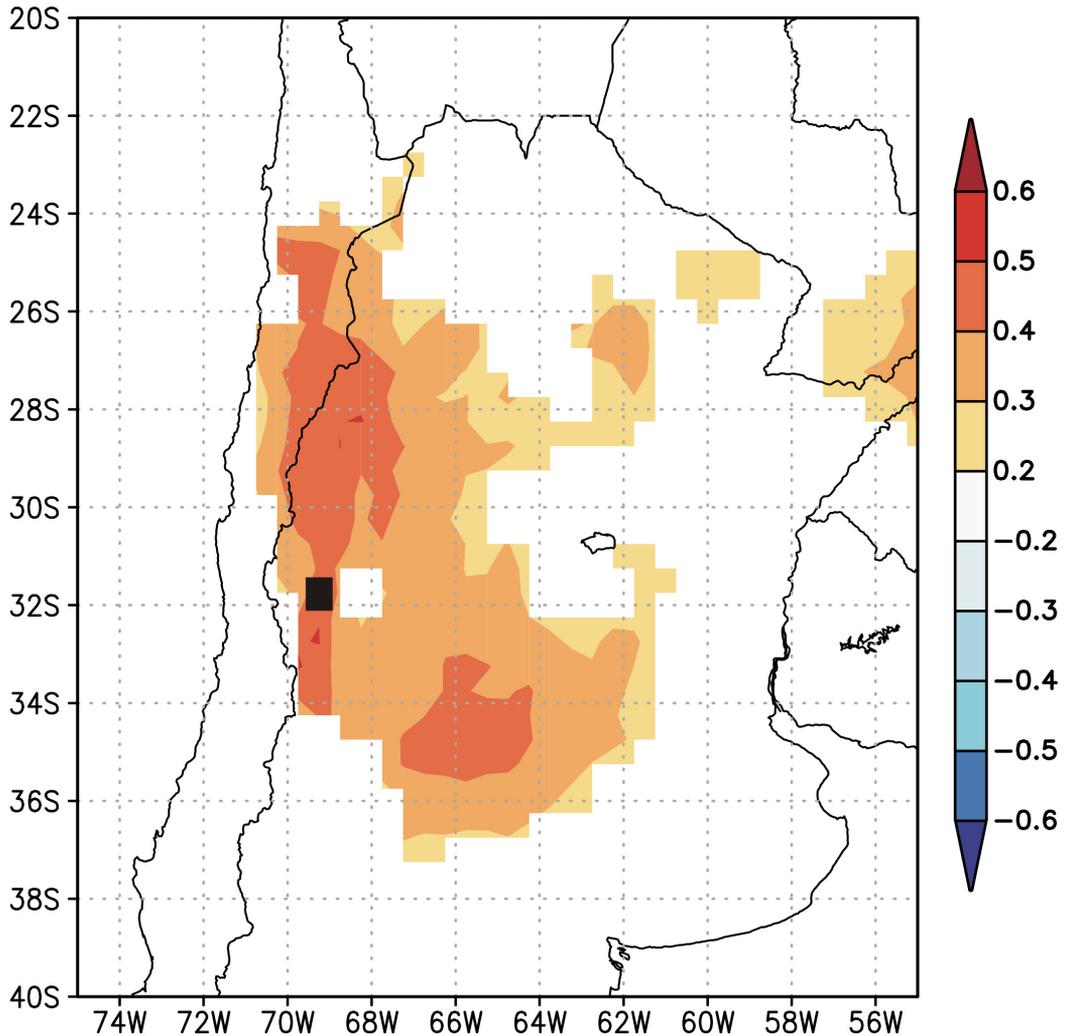


Fig. 8. Patrón de correlación espacial entre la cronología de ancho de anillo de *Proustia cuneifolia* y SPEI-6 para los meses de junio a octubre. Las áreas con colores muestran una relación significativa ($p < 0,05$). El rectángulo negro marca el área de estudio.

favorables de humedad en más de un período de tiempo, principalmente en los meses de invierno y primavera (Fig. 7A, E). Sin embargo, en las últimas décadas no se observa una relación significativa. En contraposición, *H. colleioides* mostró una tendencia opuesta a las condiciones de humedad en las mismas estaciones, pero respondiendo significativamente a esta variable en las décadas más recientes. Estas diferentes respuestas podrían estar relacionadas con una disminución en las precipitaciones en los últimos años (Anderegg et al., 2022; Schmidt, 2022) y con las estrategias que poseen estos arbustos, con *H. colleioides* como especie áfila, presentando

una mayor sensibilidad a los menores pulsos de lluvia que *P. cuneifolia* (caducifolia) (Golluscio & Oesterheld, 2007; Moreno-Gutiérrez et al., 2012; Gatica et al., 2017). La razón por la cual se observa que las precipitaciones invernales pueden afectar el crecimiento, a pesar de llegar varios meses antes de la temporada de crecimiento, se debe a su influencia duradera tanto en el contenido de humedad del suelo como en la duración de la temporada de crecimiento (St. George, 2014). Las condiciones húmedas al final del invierno son de primordial importancia para el crecimiento en sitios xéricos, ya que las tasas más altas de formación de madera en los arbustos

ocurren en primavera o principios del verano (Gazol & Camarero, 2012). Otra posibilidad es que el crecimiento radial de *P. cuneifolia* podría verse más afectado por la humedad relativa del aire en invierno que *H. collettioides* debido a la morfología de sus hojas (Oladi et al., 2017). Esto permitiría a *P. cuneifolia* aprovechar mejor la humedad para el crecimiento, ya que posee hojas grandes de mayor longevidad, a diferencia de *H. collettioides*, que es un arbusto áfilo. La humectación de hojas y copas de plantas con niebla transmitida por las nubes y rocío, a menudo puede proporcionar un importante subsidio de agua en muchos ecosistemas y, por lo tanto, afectar positivamente el equilibrio hídrico de las plantas, incluso sin aumentar notablemente la humedad del suelo (Breshears et al., 2008; Ewing et al., 2009). Además, las especies de hojas caducas generalmente favorecen la formación de anillos anuales visibles (Callado et al., 2001; Blagitz et al., 2019), lo que convertiría a *P. cuneifolia*, junto con las variaciones en el crecimiento en relación con las variables climáticas estudiadas, en una especie útil para futuros estudios dendrocronológicos.

Por otro lado, la intensificación de las correlaciones negativas de temperatura durante la temporada previa de crecimiento observadas en *H. collettioides* (1992-2015) podría deberse a que los sitios de gran elevación en latitudes medias (29° a 35° S) han experimentado aumentos de temperatura (Vuille et al., 2015). Este aumento de temperatura estival podría tener un efecto directo en una mayor intensidad de deshidratación de los suelos, relacionando esto con una sensibilidad por parte de esta especie a la variabilidad de la humedad del suelo. También, esto sugiere que la no respuesta que registró *H. collettioides* en el análisis de correlación espacial, podría tener relación a que este arbusto no responde regionalmente a las variables climáticas, sino que es más dependiente a condiciones de escala local o de micrositio. Por su parte, *P. cuneifolia* sí registró una respuesta significativa en la correlación espacial entre su cronología y SPEI-6 para los meses de julio a octubre en una extensa área del noroeste de la Argentina, mostrando una gran expresión regional de esta variable asociada a la diagonal árida. Esto refleja una alta dependencia del crecimiento a la humedad del suelo en los Andes centrales, pero también encuentra correlaciones en un territorio más amplio, que incluye el sector central de Argentina y el desierto norte de Chile. A escala global, el SPEI se correlaciona mejor que otros índices de sequía con anomalías en diferentes variables hidrológicas y ambientales (Vicente-Serrano et al., 2012). Esta diferencia en las respuestas a variables de micrositio o a escala

regional en arbustos que coexisten en el mismo ambiente, pero que poseen estrategias ecológicas diferentes, se ha observado en distintas regiones del mundo (Oladi et al., 2017; Young et al., 2016; Weijers et al., 2018).

CONCLUSIONES

Este estudio muestra el potencial dendrocronológico de dos especies de arbusto en zonas áridas en Argentina, donde las cronologías presentaron relaciones significativas con variables climáticas. La hipótesis de este trabajo fue corroborada, debido a que las especies de arbustos estudiadas con distintas estrategias foliares registraron diferentes sensibilidades a las variables ambientales. *Proustia cuneifolia* muestra sensibilidad a las condiciones de humedad existentes hacia finales de invierno y principios de primavera. En el caso de *Hualania collettioides*, si bien no registró fuertes vinculaciones al clima, una mayor incorporación de sitios podría arrojar mayores evidencias sobre el comportamiento de la relación clima-crecimiento de la especie, en contexto de sistemas orográficos complejos, teniendo en cuenta en que se observaron respuestas significativas en las últimas décadas. De acuerdo con nuestros resultados se puede argumentar que las variaciones en el ancho de los anillos anuales de *P. cuneifolia*, están influenciadas por el clima regional, principalmente debido a la variabilidad de la temperatura y el índice de aridez SPEI-6, mientras que el crecimiento de *H. collettioides* podría ser influenciado por factores a escala de micrositio, más que regionales. Esto podría abrir la oportunidad de continuar la exploración dendrocronológica de especies arbustivas de hoja caduca para estudios ecológicos y climáticos. El desarrollo de una amplia red de cronología de arbustos en ambientes áridos de la precordillera y cordillera de los Andes centrales es necesaria para una mejor comprensión sobre las respuestas del crecimiento de los arbustos al clima en el contexto del calentamiento global.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable por el permiso otorgado para trabajar en el área protegida del Valle de Pedernal. Se agradece también a Guadalupe Carvajal y Victoria Pantano por la ayuda en el campo y en las mediciones de las muestras. Se agradece también a los revisores anónimos y al editor por las sugerencias recibidas del manuscrito. Este trabajo fue financiado por PROJUVI-2017-UNSJ, dirigido por Martín Hadad.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilera-Betti, I.; C. H. Lucas, M. E. Ferrero & A. A. Muñoz. 2020. A network for advancing dendrochronology, dendrochemistry and dendrohydrology in South America. *Tree-Ring Research* 76: 94-101. DOI: <https://doi.org/10.3959/TRR2019-12>
- Anderegg, W. R.; C. Wu, N. Acil, N. Carvalhais, T. A. Pugh, J. P. Sadler & R. Seidl. 2022. A climate risk analysis of Earth's forests in the 21st century. *Science*, 377(6610): 1099-1103.
- Barichivich, J.; D. J. Sauchyn & A. Lara. 2009. Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: responses to regional and large-scale variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 320-333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.033>
- Bhandari, S.; N. Prasad, S. Shah, J. Speer, D. Raj & U. Thapa. 2019. A 307-year tree-ring SPEI reconstruction indicates modern drought in western Nepal Himalayas. *Tree-Ring Research* 75: 26-39. DOI: <https://doi.org/10.3959/1536-1098-75.2.73/>
- Bisigato, A. J.; P. E. Villagra, J. O. Ares & B. E. Rossi. 2009. Vegetation heterogeneity in Monte Desert ecosystems: A multi-scale approach linking patterns and processes. *Journal of Arid Environments* 73: 182-191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.09.001>
- Blagitz, M.; P. C. Botosso, T. Longhi-Santos & E. Bianchini. 2019. Tree rings in tree species of a seasonal semi-deciduous forest in southern Brazil: wood anatomical markers, annual formation and radial growth dynamic. *Dendrochronologia* 55: 93-104.
- Blasing, T. J.; A. M. Solomon & D. N. Duvick. 1984. Response function revisited. *Tree-Ring Bulletin* 44: 1-15.
- Blok, D.; U. Sass-Klaassen, G. Schaepman-Strub, M. M. P. D. Heijmans, P. Sauren & F. Berendse. 2011. What are the main climate drivers for shrub growth in Northeastern Siberian tundra? *Biogeosciences* 8: 1169-1179. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-8-1169-2011>
- Breshears, D. D.; N. G. McDowell, K. L. Goddard, K. E. Dayem, S. N. Martens, C. W. Meyer & K. M. Brown. 2008. Foliar absorption of intercepted rainfall improves woody plant water status most during drought. *Ecology* 89: 41-47.
- Bunn, A.; M. Korpela, F. Biond, F. Campelo, P. Mérian, F. Qeadan, C. Zang, A. Buras, J. Cecile, M. Mudelsee & M. Schulz. 2019. Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.6.2. <http://CRAN.R-project.org/package=dplR>
- Callado, C. H.; C. F. Barros, C. G. Costa, S. J. da Silva Neto & F. R. Scarano. 2001. Anatomical Features of Growth Rings in Flood-Prone Trees of the Atlantic Rain Forest in Rio De Janeiro, Brazil. *IAWA Journal* 22(1): 29-42. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-90000266>
- Camarero, J. J. & Á. Rubio-Cuadrado. 2020. Relating climate, drought and radial growth in broadleaf mediterranean tree and shrub species: a new approach to quantify climate-growth relationships. *Forests* 11(12): 1250.
- Camarero, J.; C. Valeriano, A. Gazol, M. Colangelo & R. Sánchez-Salguer. 2021. Climate differently impacts the growth of coexisting trees and shrubs under semi-arid Mediterranean conditions. *Forests* 12: 381. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12030381>
- Chen, F.; H. Shang & Y. Yuan. 2016. Dry/wet variations in the eastern Tien Shan (China) since AD 1725 based on Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) tree rings. *Dendrochronologia* 40: 110-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.07.003>
- Cook, E. R. & L. A. Kairiukstis. 1990. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>
- Dalmaso, A.; J. Márquez, A. Abarca, R. Montecchiani, M. Rosales & E. Zabaleta. 2011. Flórla del paraje de Pederal y alrededores. Departamento Sarmiento, San Juan. 1° edición. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
- Dobbert, S.; R. Pape & J. Löffler. 2021. Contrasting growth response of evergreen and deciduous arctic-alpine shrub species to climate variability. *Ecosphere* 12(8): e03688. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3688>
- Ewing, H. A.; K. C. Weathers, P. H. Templer, T. E. Dawson, M. K. Firestone, A. M. Elliott & V. K. S. Boukili. 2009. Fog water and ecosystem function: heterogeneity in a California redwood forest. *Ecosystems* 12: 417-433.
- Fritts, H. 1976. Tree-Rings and Climate. Academic Press, London, UK.
- Gatica, M. G.; J. N. Aranibar & E. Pucheta. 2017. Environmental and species-specific controls on $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ in dominant woody plants from central-western Argentinian drylands. *Austral Ecology* 42(5): 533-543.
- Gazol, A. & J. J. Camarero. 2012. Mediterranean dwarf shrubs and coexisting trees present different radial-growth synchronies and responses to climate. *Plant Ecology* 213: 1687-1698. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-012-0124-3>
- Giantomasi, M. A.; F. A. Roig Juñent, P. E. Villagra & A. M. Srur. 2009. Annual variation and influence of climate on the ring width and wood hydrosystem of *Prosopis flexuosa* DC trees using image analysis. *Trees* 23: 117-126. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0260-5>
- Golluscio, R. A. & M. Oesterheld. 2007. Water use efficiency of twenty-five co-existing Patagonian species growing under different soil water availability. *Oecologia* 154: 207-17.
- Hadad, M. A.; A. González-Reyes, F. A. Roig, V. Matskovsky & P. Cherubini. 2021. Tree-ring-based hydroclimatic

- reconstruction for the northwest Argentine Patagonia since AD 1055 and its teleconnection to large-scale atmospheric circulation. *Global and Planetary Change* 202: 103496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103496>
- Hadad, M. A.; D. Flores, V. Gallardo, F. A. Roig, Á. González-Reyes & F. Chen. 2022. Dendroclimatic potential of the *Adesmia pinifolia* shrub growing at high altitude in the Andes foothills. *Dendrochronologia* 72: 125919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125919>
- Harris, I.; T. J. Osborn, P. Jones & D. Lister. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data* 7: 109. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43(1): 69-78.
- Jiang, P.; H. Liu, X. Wu & H. Wang. 2016. Tree-ring-based SPEI reconstruction in central Tianshan Mountains of China since A.D. 1820 and links to westerly circulation. *International Journal of Climatology* 37: 2863-2872. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4884>.
- Kiesling, R. 2003. Flora de San Juan. Volumen II Ed. Estudio Sigma. Buenos Aires, Argentina.
- Kiesling, R. 2013. Flora de San Juan: volumen III. - 1a ed. - Mendoza: Zeta Editores.
- Labraga, J. C. & R. Villalba. 2009. Climate in the Monte Desert: past trends, present conditions, and future projections. *Journal of Arid Environments* 73(2): 154-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.03.016>
- Larsson, L. 2014. CooRecorder and CDendro programs of the CooRecorder/CDendro package version 7.7.
- Lu, X.; E. Liang, J. J. Camarero & A. M. Ellison. 2021. An unusually high shrubline on the Tibetan Plateau. *Ecology* 102(6): e03310. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecy.3310>
- Melián, E.; G. Gatica & E. Pucheta. 2023. Wood trait trade-offs in desert plants: A triangular model to understand intra-and interspecific variations along an aridity gradient. *Austral Ecology*. DOI: <https://doi.org/10.1111/aec.13300>
- Minetti, J. L. 1986. El régimen de precipitaciones de San Juan y su entorno. Centro de Investigaciones Regionales de San Juan (CIRSAJ) - CONICET.
- Moreno-Gutiérrez, C.; T. E. Dawson, E. Nicolas & J. I. Querejeta. 2012. Isotopes reveal contrasting water use strategies among coexisting plant species in Mediterranean ecosystem. *New Phytology* 196: 489-496
- Myers-Smith, I. H.; M. Hallinger, D. Blok, U. Sass-Klaassen, S. A. Rayback, S. Weijers, A. J. Trant, K. D. Tape, A. T. Naito, S. Wipf, C. Rixen, M. A. Dawes, J. A. Wheeler, A. Buchwal, C. Baittinger, M. Macias-Fauria, B. C. Forbes, E. Lévesque, N. Boulanger-Lapointe, I. Beil, V. Ravolainen & M. Wilmking. 2015. Methods for measuring arctic and alpine shrub growth: a review. *Earth-Science Reviews* 140: 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.10.004>
- Oladi, R.; M. Emaminasab & D. Eckstein. 2017. The dendroecological potential of shrubs in north Iranian semi-deserts. *Dendrochronologia* 44: 94-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.04.004>
- Panhi, S.; Z. Fan & A. Bräuning. 2021. Ring widths of Rhododendron shrubs reveal a persistent winter warming in the central Himalaya. *Dendrochronologia* 65: 125799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125799>
- Pasho, E.; J. J. Camarero & S. M. Vicente-Serrano. 2012. Climatic impacts and drought control of radial growth and seasonal wood formation in *Pinus halepensis*. *Trees Structure and Function* 26: 1875-1886.
- Peña-Gallardo, M.; S. M. Vicente-Serrano, J. J. Camarero, A. Gazol, R. Sánchez-Salguero, F. Domínguez-Castro, A. El Kenawy, S. Beguería-Portugés, E. Gutiérrez, M. de Luis, G. Sangüesa-Barreda, K. Novak, V. Rozas, P. A. Tiscar, J. C. Linares, E. Martínez del Castillo, M. Ribas Matamoros, I. García-González, F. Silla, Á. Camisón, M. Génova, J. M. Olano, L. A. Longares, A. Hevia & J. D. Galván. 2018. Drought sensitiveness on forest growth in peninsular Spain and the Balearic Islands. *Forests* 9(9): 524.
- Piraino, S.; E. M. Abraham, M. A. Hadad, D. Patón & F. A. R. Juárez. 2017. Anthropogenic disturbance impact on the stem growth of *Prosopis flexuosa* DC forests in the Monte desert of Argentina: a dendroecological approach. *Dendrochronologia* 42: 63-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.01.001>
- R Development Core Team. 2018. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org>
- Requena-Rojas, E. J.; M. M. Amoroso, G. Ticse-Otarola & D. B. Crispin-DelaCruz. 2021. Assessing dendrochronological potential of *Escallonia myrtilloides* in the high Andes of Peru. *Tree-Ring Research* 77: 41-52. DOI: <https://doi.org/10.3959/TRR2019-8>
- Roig, F. A. 1986. The wood of *Adesmia horrida* and its modifications by climatic conditions. *IAWA Bulletin* 7: 129-135. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-90000972>
- Roig, F.A. & J. A. Boninsegna. 1990. Environmental factors affecting growth of *Adesmia* communities as determined from tree rings. *Dendrochronologia* 8: 39-66.
- Schmidt, D. N. 2022. Summary for Policymakers: Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), Cambridge University Press.

- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic Change in Semi-arid America. Tucson, The University of Arizona Press.
- Šenfeldr, M.; R. Kaczka, A. Buras, A. Samusevich, C. Herrmann, B. Spyt, A. Menzel & V. Treml. 2021. Diverging growth performance of co-occurring trees (*Picea abies*) and shrubs (*Pinus mugo*) at the treeline ecotone of Central European mountain ranges. *Agricultural and Forest Meteorology* 308: 108608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108608>
- St. George, S. 2014. An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews* 95: 132-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.04.029>
- Stokes, M. & T. Smiley. 1968. An introduction to Tree-ring Dating. Univ. Chicago Press, Chicago.
- Tejedor, E.; M. A. Saz, J. Esper, J. M. Cuadrat & M. de Luis, M. 2017. Summer drought reconstruction in northeastern Spain inferred from a tree ring latewood network since 1734. *Geophysical Research Letters* 44: 8492-8500. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL074748>
- Trouet, V. & G. J. Van Oldenborgh. 2013. KNMI climate explorer: a web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree Ring Research* 69: 3-13.
- Vicente-Serrano, S. M.; S. Beguería & J. I. López-Moreno. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23: 1696-1718. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S. M.; J. I. López-Moreno, S. Beguería, J. Lorenzo-Lacruz, C. Azorin-Molina & E. Morán-Tejeda. 2012. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(2): 318-332. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)
- Villalba, R. & J. A. Boninsegna. 1989. Dendrochronological studies on *Prosopis flexuosa* DC. *IAWA Bulletin* 10: 155-160. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-90000483>
- Villalba, R.; P. E. Villagra, J. A. Boninsegna, M. S. Morales & V. Moyano. 2000. Dendrocronología y Dendroclimatología con especies del género *Prosopis* en Argentina. *Muldequina* 9(2):1-18.
- Vuille, M.; E. Franquist, R. Garreaud, W. S. Lavado Casimiro & B. Cáceres. 2015. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*: 120: 3745-3757.
- Waite, P. A.; C. Leuschner, S. Delzon, T. Triadiati, A. Saad & B. Schuldt. 2023. Plasticity of wood and leaf traits related to hydraulic efficiency and safety is linked to evaporative demand and not soil moisture in rubber (*Hevea brasiliensis*). *Tree Physiology* 43: 2131-2149. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad113>
- Weijers, S.; N. Beckers & J. Löffler. 2018. Recent spring warming limits near-treeline deciduous and evergreen alpine dwarf shrub growth. *Ecosphere* 9(6): e02328. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.2328>
- Wigley, T.; K. R. Briffa & P. D. Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 23: 201-213. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2)
- Young, A. B.; D. A. Watts, A. H. Taylor & E. Post. 2016. Species and site differences influence climate-shrub growth responses in West Greenland. *Dendrochronologia* 37: 69-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.12.007>
- Zang, C. & F. Biondi. 2015. Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxyclimate relationships. *Ecography* 38: 431-436. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>