



DOI: 10.29298/rmcf.v15i81.1435

Artículo de investigación

Diferencias en la respuesta de indicadores dendrocronológicos a condiciones climáticas y topográficas

Differences in the response of dendrochronological indicators to climatic and topographic conditions

Marco Aurelio González-Tagle¹, Marcos González-Cásares^{1*}, Wibke Himmelsbach¹, Homero Alejandro Gárate-Escamilla¹

Fecha de recepción/Reception date: 5 de septiembre de 2023.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 21 de diciembre de 2023.

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: marcos.gonzalezcs@uanl.edu.mx

*Corresponding author; e-mail: marcos.gonzalezcs@uanl.edu.mx

Resumen

La dinámica de la vegetación en ecosistemas forestales, comúnmente, se atribuye a factores climáticos. Sin embargo, aún existe un conocimiento limitado sobre cómo la topografía influye en la sensibilidad climática de especies forestales. Se determinó la respuesta de indicadores dendroecológicos de *Pinus arizonica* a la exposición y la variabilidad climática. Se obtuvieron índices de ancho de anillo (*IAA*) e incrementos de área basal (*IAB*). Se calculó la correlación entre los *IAA*, registros mensuales de precipitación acumulada (*PP*) y temperaturas medias (*T_{máx}* y *T_{mín}*) en tres periodos: 1990-2000 (B1), 2001-2011 (B2) y 2012-2021 (B3). Se realizaron las pruebas de *Mann-Whitney* y de *Kruskall-Wallis* para comprobar diferencias en el *IAB* por exposición (noroeste, NO y noreste, NE) y por bloque temporal, respectivamente. La *T_{máx}* limitó el crecimiento en los tres periodos, la *T_{mín}* lo restringió en el B2 y la *PP* lo favoreció en los B1 y B2. Se detectó un mayor *IAB* en la exposición NO (224.7 mm² año⁻¹) en comparación con la NE (143.9 mm² año⁻¹). Existió un aumento significativo en el *IAB* en los periodos B2 (62.1 mm² año⁻¹) y B3 (56.9 mm² año⁻¹) en comparación con el B1 (51.2 mm² año⁻¹). Esto resalta la importancia de considerar la topografía al analizar las asociaciones clima-crecimiento de especies forestales. Considerar la interacción de factores climáticos y microclimas asociados a la topografía específica del sitio, genera una visión integral de los procesos ecológicos, lo que permite proponer mejores estrategias de manejo forestal para la mitigación de los efectos del Cambio Climático.

Palabras claves: Incremento de área basal, dendroecología, *dpIR*, anillos de crecimiento, exposición topográfica, *Pinus arizonica* Engelm.

Abstract

Vegetation dynamics in forest ecosystems are commonly attributed to climatic factors. However, there is still limited knowledge on how topography influences the climatic sensitivity of forest species. The response of dendroecological indicators of *Pinus arizonica* to exposure and climatic variability was determined. Indices of ring width (*RWI*) and Basal area increments (*BAI*) were obtained. The correlation between *RWI* and monthly records of accumulated precipitation (*PP*) and mean temperatures (*T_{max}* and *T_{min}*) was calculated for three periods: 1990-2000 (B1), 2001-2011 (B2), and 2012-2021 (B3). Mann-Whitney and Kruskal-Wallis tests were performed to test

for differences in *BAI* by exposure (northwest, NW and northeast, NE) and by time period, respectively. *Tmax* limited growth in all three periods, *Tmin* restricted it in B2 and *PP* favored it in B1 and B2. A higher *BAI* was detected in the NW exposure ($224.7 \text{ mm}^2 \text{ yr}^{-1}$) compared to the NE ($143.9 \text{ mm}^2 \text{ yr}^{-1}$). There was a significant increase in *BAI* in periods B2 ($62.1 \text{ mm}^2 \text{ yr}^{-1}$) and B3 ($56.9 \text{ mm}^2 \text{ yr}^{-1}$) compared to B1 ($51.2 \text{ mm}^2 \text{ yr}^{-1}$). This highlights the importance of considering topography when analyzing climate-growth associations of forest species. Considering the interaction of climatic factors and microclimates associated with site-specific topography generates an integrated view of ecological processes. This allows proposing better forest management strategies to mitigate the effects of Climate Change.

Keywords: Basal area increment, dendroecology, dplR, growth rings, topographic exposure, *Pinus arizonica* Engelm.

Introducción

La variabilidad climática desempeña un papel fundamental en la distribución y desarrollo de las especies forestales (Diao *et al.*, 2023). Además, se han observado efectos del Cambio Climático que han llevado al deterioro del crecimiento e incluso a la disminución de ciertos taxa en distintos ecosistemas forestales (Allen *et al.*, 2010). El incremento en la severidad e intensidad de las sequías, relacionado con el aumento de la temperatura media global (IPCC, 2023), es un fenómeno significativo. Por lo tanto, comprender el impacto de las condiciones climáticas en el desarrollo de las comunidades vegetales es esencial para desentrañar los mecanismos de vulnerabilidad y adaptación de las especies.

El estudio entre el clima y el crecimiento se ha abordado a través de indicadores basados en los anillos de crecimiento (Acosta-Hernández *et al.*, 2017). Se han identificado disparidades en la respuesta de los índices de ancho de anillo (*IAA*) entre especies que coexisten en un mismo hábitat (González-Cásares *et al.*, 2017) y entre aquellas establecidas en distintas ubicaciones geográficas (Pompa-García *et al.*, 2017). Estas respuestas diferenciadas se atribuyen a condiciones microambientales, en las cuales la topografía, la pendiente y la exposición emergen como variables destacadas (Urrutia-Jalabert *et al.*, 2021). Por lo tanto, las formas heterogéneas del relieve originan microhábitats caracterizados por condiciones ambientales específicas, incluso en áreas con un clima local semejante. Elementos

como la altitud, pendiente y exposición desempeñan un papel crucial en la generación de condiciones que influyen en el establecimiento y crecimiento de las especies forestales, los cuales afectan la humedad, la disponibilidad de luz solar y la exposición al viento, entre otros (Resler *et al.*, 2005; Sundqvist *et al.*, 2013; Pyatt *et al.*, 2016).

En los últimos años, en México se ha observado un incremento en el interés por la ecología de los ecosistemas forestales mediante la adopción de enfoques dendroecológicos como vía de estudio (Acosta-Hernández *et al.*, 2017). En múltiples investigaciones se ha indagado en el impacto de las condiciones climáticas y las sequías en el crecimiento radial de diversas especies (González-Cásares *et al.*, 2017). Sin embargo, en el contexto nacional, aún persiste una brecha en cuanto al estudio de la influencia de las variables topográficas en indicadores dendroecológicos, como los índices de ancho de anillo o el incremento de área basal derivado de los anillos de crecimiento, y como responden a las variables climáticas.

Por lo tanto, en este estudio se analiza la respuesta del índice de ancho de anillo y el incremento anual de área basal ante condiciones climáticas y topográficas. Se establecieron dos objetivos: (1) Evaluar la respuesta del índice de ancho de anillo ante las variables mensuales de precipitación y temperatura, a partir de la exploración de posibles variaciones en dicha respuesta en intervalos de 10 años, y (2) Valorar el impacto de la exposición topográfica en el incremento de área basal en árboles de *Pinus arizonica* Engelm. var. *stormiae* Martínez, especie con distribución limitada en un área árida de la Sierra Madre Oriental. Las variaciones en los indicadores dendrocronológicos se relacionan con las variables mensuales de precipitación y temperatura. Además, se planteó la hipótesis de que la exposición topográfica ejercerá un impacto en el incremento del área basal en árboles de *Pinus arizonica*.

Materiales y Métodos

Área y especie de estudio

El sitio de estudio Río de San José se ubica en la Sierra Madre Oriental, específicamente en el municipio Galeana, Nuevo León (Figura 1).

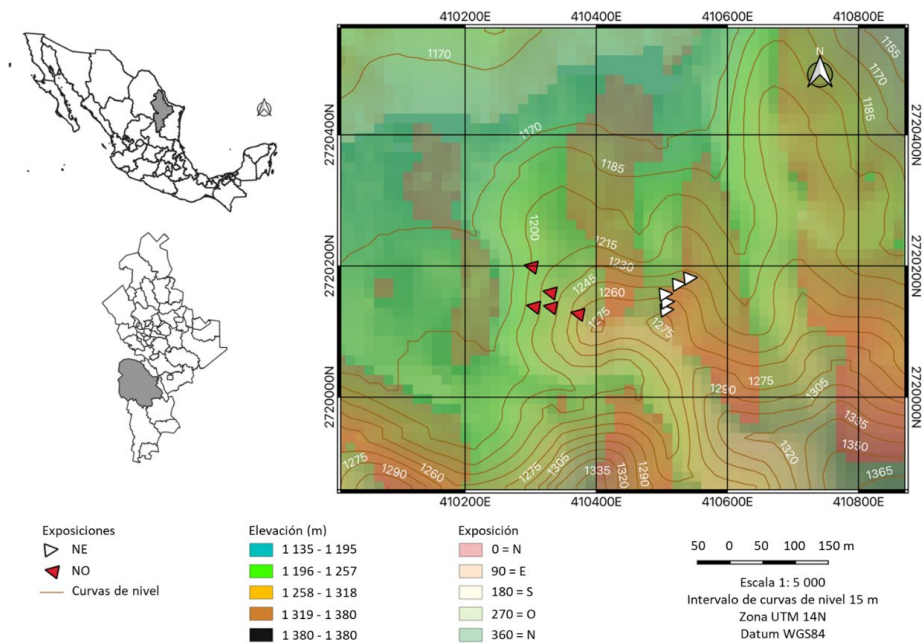
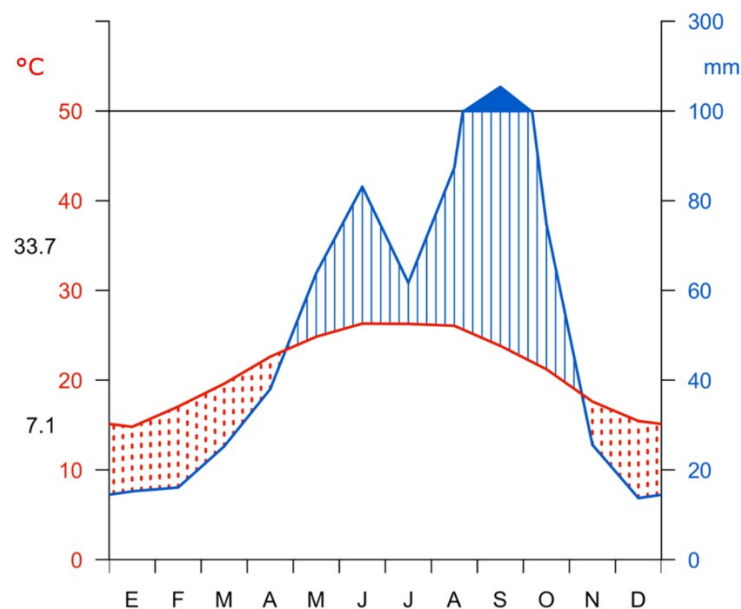


Figura 1. Localización del área de estudio en el ejido Río de San José, municipio Galeana, Nuevo León, México.

El clima predominante es semiseco, semicálido, caracterizado por inviernos frescos. La temperatura media anual es de 21.3 °C, la precipitación acumulada alcanza los 663 mm anuales, 58 % se registra entre los meses de junio y septiembre (Figura 2) (Harris *et al.*, 2020). El tipo de suelo predominante es el Litosol, caracterizado por su naturaleza pedregosa y poco desarrollado, con gran cantidad de material calcáreo (Schad, 2023).



Río de San José (1 240 m). 1990 a 2022. 21.3 °C, 660 mm.

Figura 2. Climograma de *Walter-Lieth* para la precipitación y temperatura media mensual del periodo 1990-2022

Pinus arizonica var. *stormiae*. Son árboles de tamaño medio, con altura de 15-20 m. Forma rodales puros, comúnmente se presenta mezclada con especies de *Quercus* L. spp., *Pinus engelmannii* Carrière y *P. strobiformis* Engelm. Crece en bosques moderadamente secos a mésicos, con suelos de tipo yesoso y altitudes de 1 500 a 2 800 m (Farjon *et al.*, 1997). Principalmente se distribuye en el sur

de Nuevo León, con algunas localidades en el sur de Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí (Farjon *et al.*, 1997).

Muestreo y preparación de muestras

Se seleccionaron dos sitios con exposiciones diferentes: noreste (NE) y noroeste (NO); en cada uno de ellos se eligieron cinco árboles (Figura 1) con diámetro normal >20 cm (forcípula, *Haglöff*[®] Mantax Blue), buen vigor, apariencia longeva y fuste recto, cilíndrico, sin bifurcaciones y que presentara el menor disturbio posible. Se registraron las coordenadas (GPS, *Garmin eTrex*[®] 25x) de cada árbol y se obtuvieron dos núcleos de crecimiento de cada uno con una barrena de *Pressler (Häglöff*[®], 5 mm) y en sentidos opuestos, siempre en dirección perpendicular a la pendiente del terreno (González-Tagle *et al.*, 2023). Los núcleos de incremento radial se fijaron a guías de madera con pegamento blanco y se dejaron secar a temperatura ambiente. Posteriormente se lijaron con lija de grano sucesivamente más fino (100:1 000) (González-Tagle *et al.*, 2023).

Cronología de ancho de anillo e incremento de área basal

Las muestras se fecharon visualmente utilizando un estereomicroscopio (*AmScope*[™] SM-4TPZ-B). Se identificaron patrones de crecimiento y se le asignó a cada anillo su

año de formación (Fritts, 2001). Se midió el ancho de anillo mediante el sistema de medición *VELMEX*[®] (0.001 mm) y el *software Measure J2X V5.03* (VoorTech Consulting, 2021). La calidad de la datación visual se evaluó estadísticamente, para ello se compararon las series individuales de cada árbol con la cronología maestra de la especie. Este procedimiento se realizó con el programa COFECHA (Grissino-Mayer, 2001). Se construyó una cronología residual de ancho de anillo de *Pinus arizonica*. Las series de ancho de anillo se estandarizaron para eliminar las tendencias de crecimiento no asociadas al clima como la geometría y edad del árbol para obtener índices de ancho de anillo (*IAA*). Se aplicó un modelo autorregresivo a los índices generados (Bunn, 2008). Posteriormente se calculó la cronología residual de ancho de anillo, para lo cual se usó una media robusta para determinar los promedios de los índices individuales. Se utilizaron los índices residuales de ancho de anillo para eliminar la mayor parte de la autocorrelación temporal relacionada con el crecimiento del año anterior (Cook and Holmes, 1986).

Se calculó el incremento de área basal (*IAB*) de *Pinus arizonica* mediante la siguiente fórmula (Bunn, 2008):

$$IAB(cm^2) = \pi(R_t^2 - R_{t-1}^2)$$

Donde:

R = Radio del árbol sin corteza a la altura donde se extrajo el núcleo (1.3 m)

t = Año de formación del anillo

Primero se obtuvo el *IAB* a nivel de muestra (núcleo), a continuación, se calculó la media anual de *IAB* para cada árbol. La construcción de la cronología y el cálculo del *IAB* se hizo con el paquete *dplR* (*Dendrochronology Program Library in R*) (Bunn, 2008) del *software* estadístico R (R Core Team, 2021).

Datos climáticos

Se obtuvieron datos climáticos mensuales: medias de temperatura máxima y mínima y precipitación total. Los datos se descargaron de *Climate Research Unit* de la página <http://climexp.knmi.nl/> (Harris *et al.*, 2020). Se calcularon coeficientes de correlación entre los datos climáticos y la cronología residual de la especie para el periodo 1920-2021, y se evaluó la variación de la sensibilidad del crecimiento radial de la especie en función del tiempo para ventanas temporales de 10 años: 1990-2000 (B1), 2001-2011 (B2) y 2012-2021 (B3).

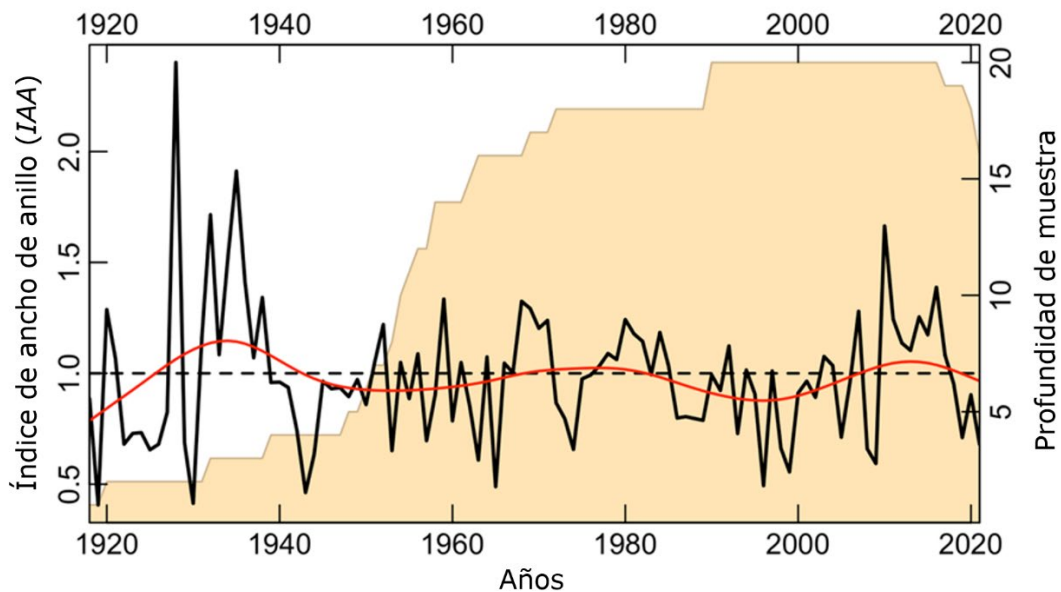
Análisis estadístico

Para determinar si existían diferencias significativas en el incremento de área basal (*IAB*) entre las exposiciones noreste y noroeste, se empleó la prueba *U* de *Mann-Whitney* (Rubio-Cuadrado *et al.*, 2021). La existencia de diferencias significativas entre los bloques temporales se evaluó mediante la prueba de *Kruskall-Wallis* y una prueba de comparación múltiple de *Dunn* (Hood *et al.*, 2018). La elección de estos análisis se basó en la naturaleza de los datos, los cuales no mostraron una distribución normal. Ambos se realizaron con el paquete *ggstatsplot* de R (Patil, 2021).

Resultados

Asociación clima-crecimiento radial

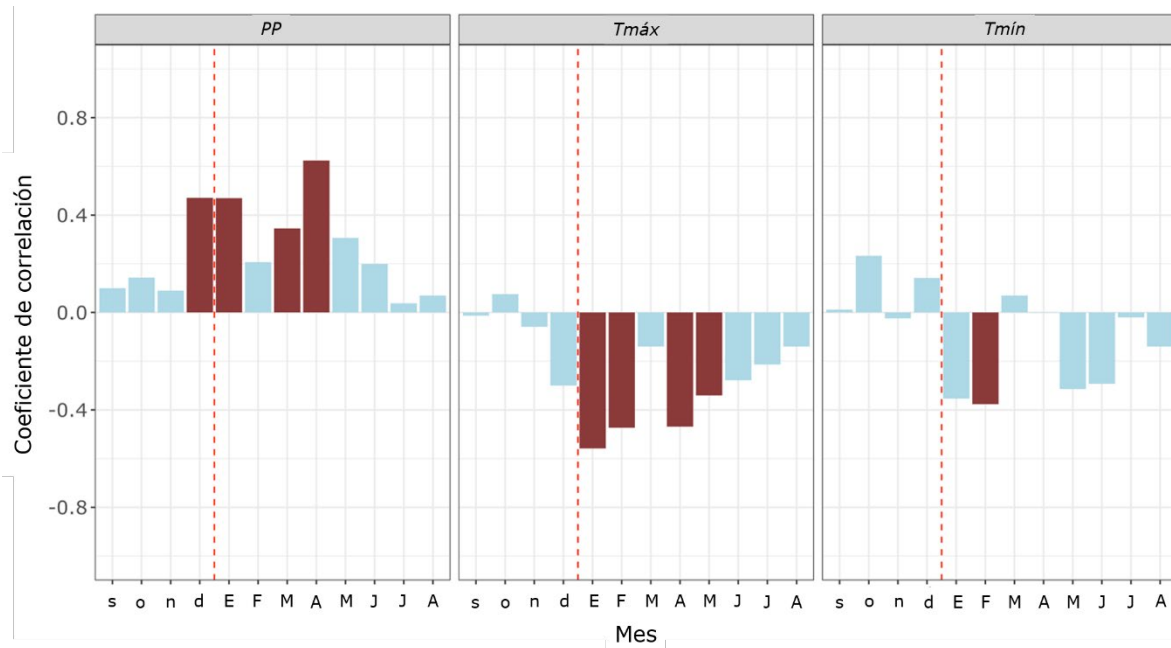
La cronología de ancho de anillo (Figura 3) mostró el patrón de crecimiento de los 10 árboles de *Pinus arizonica*. Se obtuvo una correlación entre segmentos (0.38) que fue superior a 0.328 ($p > 0.01$) requerido por COFECHA; la señal expresada de la población (EPS) fue de 0.88. La autocorrelación de primer orden fue de 0.49 y la relación señal ruido de 7.85. Se apreció un *IAA* bajo en los años 1996, 1998-1999, 2008-2009, 2019 y 2021; se observó un *IAA* alto en los años 1993, 2007, 2010 y 2016.



La línea sólida representa el índice de ancho de anillo.

Figura 3. Cronología de ancho de anillo de *Pinus arizonica* Engelm. var. *stormiae* Martínez para el periodo de 1920 a 2021.

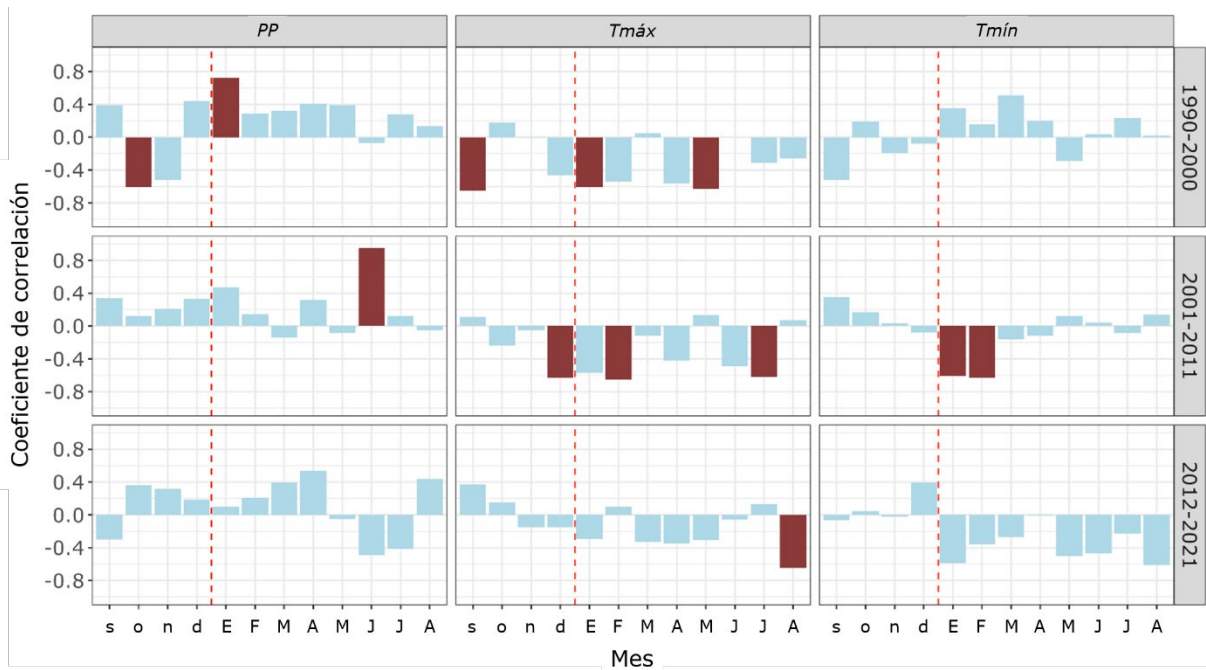
Al considerar el periodo 1990-2021, se determinaron correlaciones significativas entre las variables climáticas y el *IAA*. La precipitación de diciembre previo al año de crecimiento, así como la de enero y abril en el año de crecimiento, se correlacionó positiva y significativamente con el *IAA*. La temperatura máxima de diciembre previo al año de crecimiento y de enero, febrero y abril en el año de crecimiento, se correlacionó negativa y significativamente con el *IAA* (Figura 4).



PP = Precipitación mensual acumulada; *Tmáx* = Promedio de temperatura máxima; *Tmín* = Promedio de temperatura mínima. Las correlaciones significativas (95 %) se muestran representadas por barras de color rojo. Los meses en minúsculas corresponden al año previo del crecimiento y los que están en mayúsculas al año actual de crecimiento.

Figura 4. Asociaciones crecimiento-clima en el periodo 1990-2021.

Los análisis de correlación revelaron variaciones temporales significativas (Figura 5). Entre 1990-2000, la precipitación en enero del año de crecimiento influyó positiva y significativamente en el *IAA*. En los 10 años siguientes, el *IAA* se correlacionó positiva y significativamente con la precipitación del mes de junio del año de crecimiento.



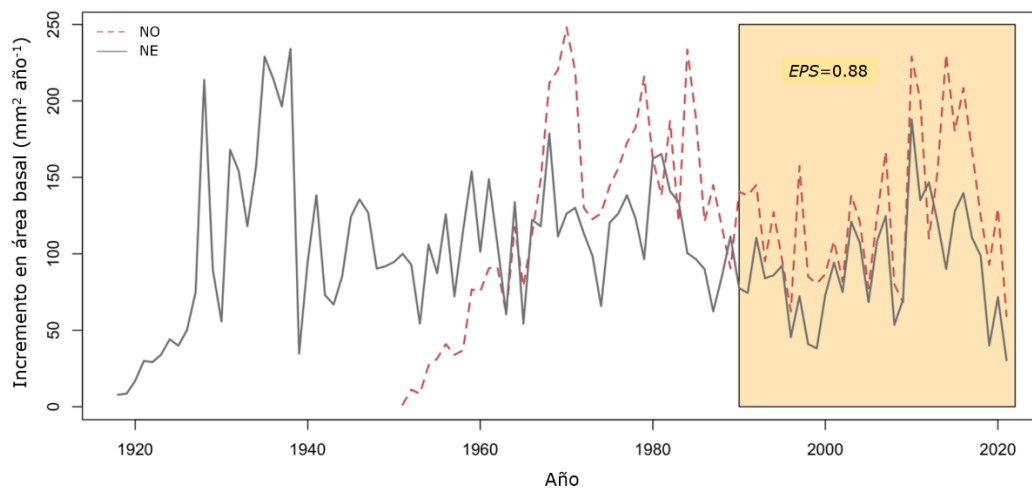
PP = Precipitación mensual acumulada; *Tmáx* = Promedio de temperatura máxima; *Tmín* = Promedio de temperatura mínima. Las correlaciones significativas (95 %) se muestran representadas por barras de color rojo. Los meses en minúsculas corresponden al año previo del crecimiento y los que están en mayúsculas al año actual de crecimiento.

Figura 5. Asociaciones crecimiento-clima en los bloques temporales 1990-2000 (B1), 2001-2011 (B2) y 2012-2021 (B3).

El *IAA* respondió negativa y significativamente a la *Tmáx* de diferentes meses entre periodos. Para el lapso de 1990-2000, fue la *Tmáx* de enero y mayo del año de crecimiento. Entre 2001-2011, con la *Tmáx* de diciembre previo, así como con las *Tmáx* de febrero y julio del año de crecimiento. En el periodo 2012-2021, con la *Tmáx* de agosto del año de crecimiento. La *Tmín* solo afectó negativa y significativamente el *IAA* en el periodo 2001-2011, particularmente, la *Tmín* de enero y febrero del año de crecimiento.

Efecto de la exposición en el incremento de área basal

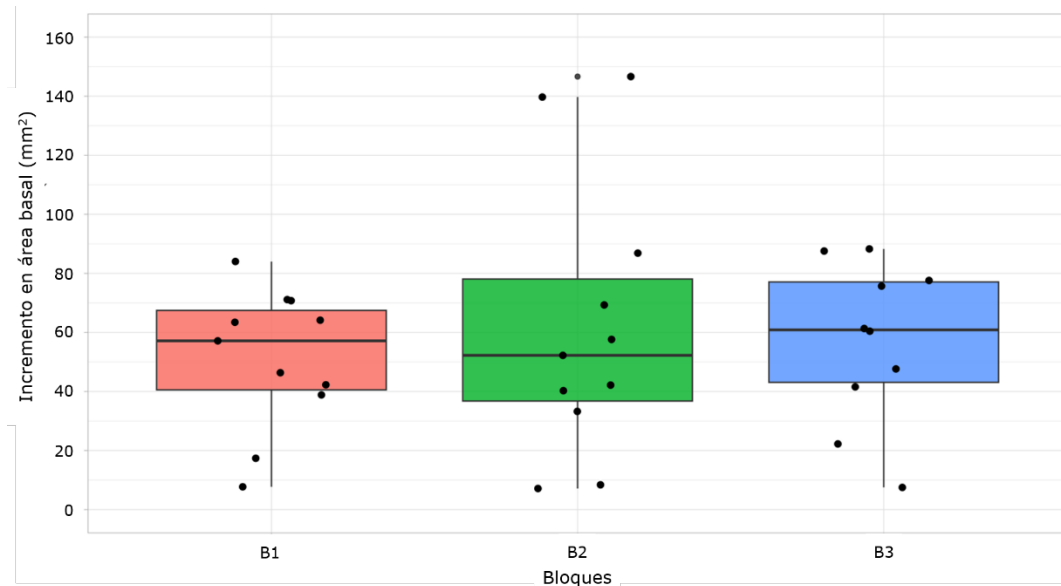
El análisis de *U* de *Mann-Whitney* reveló diferencias significativas en el incremento de área basal entre exposiciones ($p < 0.001$) para el periodo 1990-2021 (Figura 6). Los árboles de *Pinus arizonica* en la exposición noroeste presentaron un *IAB* medio significativamente mayor ($224.7 \text{ mm}^2 \text{ año}^{-1}$) en comparación con los árboles expuestos en la dirección noreste ($143.9 \text{ mm}^2 \text{ año}^{-1}$).



En el recuadro amarillo se muestra el periodo analizado de 1990-2021.

Figura 6. Comparación entre el incremento de área basal (*IAB*) de los árboles de *Pinus arizonica* Engelm. var. *stormiae* Martínez entre la exposición noreste (NE) y noroeste (NO).

La prueba de *Kruskall-Wallis* presentó diferencias significativas en el incremento de área basal entre los bloques temporales de crecimiento ($p < 0.001$) (Figura 7). La prueba de comparación múltiple de *Dunn* indicó que el *IAB* en los periodos 2001-2011 (B2, 62.1 mm² año⁻¹) y 2012-2021 (B3, 56.9 mm² año⁻¹) no mostraron una diferencia significativa entre sí ($p > 0.05$). Sin embargo, tanto B2 como B3 exhibieron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el *IAB* en comparación con el periodo 1990-2000 (B1, 51.2 mm² año⁻¹).



B1 = 1990-2000; B2 = 2001-2011; B3 = 2012-2021.

Figura 7. Comparación entre el incremento de área basal (*IAB*) de los árboles de *Pinus arizonica* Engelm. var. *stormiae* Martínez entre los bloques temporales de crecimiento.

Los años que registraron bajos *IAA* (Figura 3) coincidieron con bajos registros en el sitio del índice de sequía de *Palmer* (*PDSI*) (Stahle *et al.*, 2016). Asimismo, concordaron con los registros más bajos del índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (*SPEI*) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) y el análisis de superposición de épocas (Figura 8).

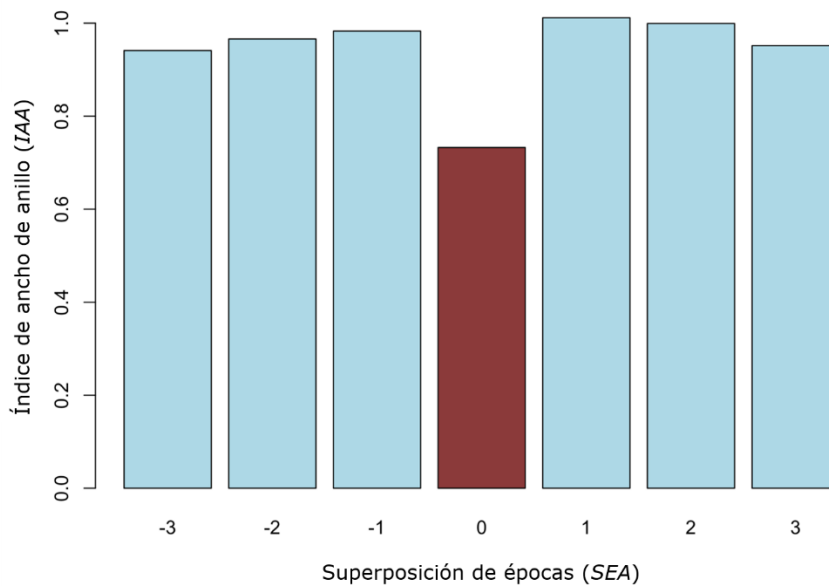


Figura 8. Resultados del análisis de superposición de épocas (*SEA*) que muestran la influencia significativa de los episodios de sequía en *IAA* de *Pinus arizonica* Engelm. var. *stormiae* Martínez.

Discusión

En el presente estudio se investigó la influencia de variables climáticas mensuales, como la temperatura y la precipitación, en el crecimiento radial de *Pinus arizonica* en una región semiárida de la Sierra Madre Oriental. También se evaluó si esta

respuesta variaba en intervalos de 10 años. Para comprender la productividad forestal en exposiciones topográficas específicas (noreste y noroeste), se examinó el incremento de área basal (*IAB*). Estos análisis enriquecen la comprensión de la sensibilidad y adaptabilidad de *Pinus arizonica* var. *stormiae* a las condiciones climáticas.

La importancia de los hallazgos radica en su potencial para mejorar la comprensión de la ecología de *Pinus arizonica*, especialmente en el contexto de la mitigación de los efectos previstos del Cambio Climático y sus posibles implicaciones, como el aumento de la temperatura media global (IPCC, 2023).

Asociación clima-crecimiento radial

Se obtuvo una correlación significativa entre el índice de ancho de anillo (*IAA*) y las condiciones climáticas, específicamente la precipitación y la temperatura máxima. Un mayor crecimiento radial de la especie estuvo relacionado con mayores niveles de precipitación en diciembre previo a enero y abril del año de crecimiento, mientras que la temperatura máxima en esos mismos meses y febrero limitó el *IAA* (González-Cásares *et al.*, 2017).

En la Sierra Madre Occidental se observó que *Pinus arizonica* fue altamente sensible a las variables climáticas, en particular a la temperatura máxima durante un periodo más amplio, que abarcó desde octubre previo hasta junio de crecimiento. Además se identificó que la temperatura mínima de abril tuvo un efecto limitante significativo en el crecimiento (González-Cásares *et al.*, 2017). Esas diferencias en la sensibilidad se atribuyen tanto a las características específicas de la variedad estudiada como a las condiciones del sitio, que se caracteriza por ser un área seca durante todo el año (Harris *et al.*, 2020).

Adicionalmente, se ha constatado que los índices de ancho de anillo de esta especie en el noroeste de México exhiben una estrecha conexión con los fenómenos circulatorios de gran escala como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la oscilación del Pacífico Norte (NPO) y El Niño en la región 3.4 (González-Cásares *et al.*, 2017).

Además, se detectaron diferencias en la respuesta del *IAA* a las variables climáticas en función de los bloques temporales. Durante el periodo 1990-2000, la precipitación de enero influyó significativamente en el crecimiento radial, mientras que en el periodo 2001-2011, fue la precipitación de junio la que tuvo un impacto significativo debido a la ocurrencia de huracanes y tormentas tropicales en esos años (NHC y CPH, 2023).

En cuanto a las temperaturas máximas, se registró una disminución significativa en el crecimiento radial de *Pinus arizonica* en los periodos 1990-2000 y 2001-2011 como respuesta a las temperaturas máximas de tres meses. Sin embargo, durante el último periodo de estudio (2012-2021), solo la temperatura máxima de agosto tuvo un efecto limitante en el *IAA*, lo cual indica que el aumento de la temperatura está afectando el crecimiento de la especie. Además, la temperatura mínima influyó significativamente solo el periodo 2001-2011, con una asociación negativa entre la temperatura mínima de enero y febrero y el *IAA* de *Pinus arizonica*. Dichas variaciones en la sensibilidad del crecimiento radial se relacionaron con cambios en las temperaturas locales a lo largo de los tres períodos (Harris *et al.*, 2020).

Efecto de la exposición y bloques temporales en el *IAB*

El aumento del incremento de área basal (*IAB*) responde a la exposición topográfica; tal comportamiento está documentado en diversos estudios debido a la compleja interacción de factores como la radiación solar y el microclima que, en conjunto, generan diversos microhábitats (Vitali *et al.*, 2017). Esos micrositios

albergan condiciones que influyen en las diferencias del incremento de área basal de la especie. Elementos como la temperatura y la disponibilidad de agua y nutrientes (Lévesque *et al.*, 2016) impactan en los indicadores dendrocronológicos. Aunque el género *Pinus* se puede desarrollar bien en sitios pobres y secos, es importante considerar la composición del suelo Regosol, pedregoso y con baja capacidad de almacenamiento de agua (Eilmann *et al.*, 2013), condiciones que se acentúan con la variación topográfica.

Las diferentes exposiciones tienen como resultado condiciones específicas en espacios geográficos limitados. Aunque la altitud y pendiente no fueron abordadas en esta investigación, son variables topográficas que influyen en las relaciones clima-crecimiento radial (Pompa-García *et al.*, 2017). En un estudio realizado en un bosque templado seco con presencia de coníferas, se documentó que la heterogeneidad y escasa vegetación en aumenta la temperatura del suelo, lo cual favorece una alta tasa de evapotranspiración (Breshears *et al.*, 1998). Comparativamente, en el área de la región del ejido Río San José se puede observar la escasa vegetación y una alta heterogeneidad espacial de los individuos. Estos factores pueden conducir a variaciones en el crecimiento de los árboles y en el *IAB* a través de diferentes exposiciones topográficas dentro del área de estudio.

Se observó un aumento significativo en el *IAB* de los árboles de *Pinus arizonica* en los bloques temporales B2 y B3 en comparación con el periodo B1. Este aumento en el *IAB* podría relacionarse con cambios en las condiciones ambientales durante esos periodos. Lo anterior se refleja en las variables climáticas, especialmente durante el periodo 1990-2000, en el que se documentó una menor precipitación en contraste con los otros dos segmentos temporales. En esa década, se registró una precipitación media anual de 556 mm, es decir, 159 y 167 mm menos que los bloques B2 y B3, respectivamente. Además, fue el único periodo que presentó un mes de verano seco (Figura 7) (Harris *et al.*, 2020).

Limitaciones y perspectivas

La distribución restringida de una especie vulnerable en una zona propensa a la sequía limitó la disponibilidad de árboles para el muestreo. En consecuencia, la poca cantidad de individuos analizados compromete la adecuada representación de la variabilidad intrínseca de la población. Ello implica que la escasa muestra podría no abarcar completamente la diversidad de respuestas individuales a las condiciones climáticas y topográficas. Adicionalmente, la capacidad para identificar patrones temporales y tendencias a lo largo de los bloques, posiblemente también se comprometa con un número reducido de árboles. Esto podría afectar la capacidad del estudio para detectar respuestas en el corto plazo a eventos climáticos o disturbios. Para fortalecer la robustez de futuros análisis, se recomienda ampliar la cantidad de árboles muestreados, así como considerar distintas exposiciones y evaluar otras variables ambientales que influyan en el crecimiento de la especie, como los índices de sequía. No obstante, es importante destacar que, a pesar de las limitaciones en la cantidad de árboles muestreados, la investigación aporta significativamente al conocimiento general de la especie.

Conclusiones

Se confirma la premisa del impacto significativo de las condiciones climáticas y de la exposición sobre el índice de ancho de anillo y el incremento de área basal, respectivamente. Se evidencia una diferencia en el incremento de área basal entre ventanas temporales. El crecimiento de *Pinus arizonica* presenta diferencias en respuesta a la variación climática a lo largo de tres décadas, lo cual permite discernir

como responde el incremento del área basal ante las cambiantes condiciones de temperatura y precipitación. Estos hallazgos consolidan la importancia de considerar la topografía cuando se evalúen las dinámicas de crecimiento en el contexto del Cambio Climático.

El empleo de estas técnicas dendrocronológicas es fundamental para comprender el comportamiento de la especie frente a condiciones climáticas cambiantes y, por lo tanto, ofrecer información valiosa para la gestión forestal y la evaluación de los recursos forestales en el área de estudio. Se sugiere explorar la aplicabilidad de este enfoque en diferentes regiones geográficas y con diversas especies arbóreas para mejorar la comprensión de la respuesta de los indicadores dendrocronológicos ante las influencias del clima y la topografía en un entorno árido. Además, este estudio enriquece el conocimiento sobre la ecología de *Pinus arizonica* en relación con la exposición topográfica y las condiciones climáticas; ambos factores deben considerarse en las estrategias de manejo de las especies forestales, especialmente, en el contexto de la adaptación de los efectos del cambio climático.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Azeneth García por su apoyo en la recolecta y extracción de los núcleos de incremento en campo, así como en la medición de los anillos en el Laboratorio de Dendrocronología de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Marcos González Cásares agradece a Conahcyt por la beca otorgada por el programa Estancias Posdoctorales por México 2022.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Marco Aurelio González-Tagle: concepción y diseño del experimento, procuración de fondos y desarrollo del manuscrito; Marcos González-Cásares: realización del análisis de datos y desarrollo del manuscrito; Wibke Himmelsbach: revisión del manuscrito y colecta de campo; Homero Alejandro Gárate-Escamilla: revisión del manuscrito.

Referencias

- Acosta-Hernández, A. C., M. Pompa-García and J. J. Camarero. 2017. An updated review of dendrochronological investigations in Mexico, a megadiverse country with a high potential for Tree-Ring Sciences. *Forests* 8(5):160. Doi: 10.3390/f8050160.
- Allen, C. D., A. K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, ... and N. Cobb. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4):660-684. Doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.001.
- Breshears, D. D., J. W. Nyhan, C. E. Heil and B. P. Wilcox. 1998. Effects of woody plants on microclimate in a semiarid woodland: Soil temperature and evaporation in canopy and intercanopy patches. *International Journal of Plant Sciences* 159(6):1010-1017. Doi: 10.1086/314083.
- Bunn, A. G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2):115-124. Doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002.
- Cook, E. R. and R. L. Holmes. 1986. Appendix 2: Users manual for program ARSTAN. In: Holmes, R. L., R. K. Adams and H. C. Fritts. *Tree-ring chronologies of*

western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ, United States of America. pp. 50-65.

Diao, Y., S. Zhang, Y. Liu, G. Jin, S. Tian and Y. Liu. 2023. Effects of topography on radial growth of tree species with different mycorrhizal types. *Forests* 14(3):546. Doi: 10.3390/f14030546.

Eilmann, B., M. Dobbertin and A. Rigling. 2013. Growth response of Scots pine with different crown transparency status to drought release. *Annals of Forest Science* 70:685-693. Doi: 10.1007/s13595-013-0310-z.

Farjon, A., J. A. Pérez de la Rosa and B. T. Styles. 1997. A field guide to the pines of Mexico and Central America. Royal Botanic Gardens. Richmond, LDN, England. 147 p.

Fritts, H. C. 2001. Tree rings and climate. Blackburn Press. Caldwell, NJ, United States of America. 567 p.

González-Cásares, M., M. Pompa-García and J. J. Camarero. 2017. Differences in climate-growth relationship indicate diverse drought tolerances among five pine species coexisting in Northwestern Mexico. *Trees* 31:531-544. Doi: 10.1007/s00468-016-1488-0.

González-Tagle, M. A., J. Cerano-Paredes, W. Himmelsbach, E. Alanís-Rodríguez and Á. A. Colazo-Ayala. 2023. Fire records based on dendrochronological techniques for a coniferous forest in the southeastern region of Jalisco, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 29(1):35-50. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2022.03.018.

Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57(2):205-221. https://www.ltrr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Grissino_mayer_COFECHA_2001.pdf. (20 de septiembre de 2023).

Harris, I., T. J. Osborn, P. Jones and D. Lister. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data* 7:1-18. Doi: 10.1038/s41597-020-0453-3.

Hood, S. M., D. R. Cluck, B. E. Jones and S. Pinnell. 2018. Radial and stand-level thinning treatments: 15-year growth response of legacy ponderosa and Jeffrey pine trees. *Restoration Ecology* 26(5):813-819. Doi: 10.1111/rec.12638.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, World Meteorological Organization (WMO) and United Nations Environment Programme (UNEP). Geneva, GE, Switzerland. 184 p.

Lévesque, M., L. Walthert and P. Weber. 2016. Soil nutrients influence growth response of temperate tree species to drought. *Journal of Ecology* 104(2):377-387. Doi: 10.1111/1365-2745.12519.

National Hurricane Center (NHC) and Central Pacific Hurricane Center (CPHC). 2023. NHC Data Archive, Tropical Cyclone Reports (TCRs). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). <https://www.nhc.noaa.gov/data/#tcr>. (20 de septiembre de 2023).

Patil, I. 2021. statsExpressions: R Package for Tidy Dataframes and Expressions with Statistical Details. *Journal of Open Source Software* 6(61):3236. Doi: 10.21105/joss.03236.

Pompa-García, M., M. González-Cásares, A. C. Acosta-Hernández, J. J. Camarero and M. Rodríguez-Catón. 2017. Drought influence over radial growth of Mexican conifers inhabiting mesic and xeric sites. *Forests* 8(5):175. Doi: 10.3390/f8050175.

Pyatt, J. C., D. F. Tomback, S. C. Blakeslee, M. B. Wunder, ... and H. D. Beveney. 2016. The importance of conifers for facilitation at treeline: Comparing biophysical characteristics of leeward microsites in Whitebark Pine Communities. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 48(2):427-444. Doi: 10.1657/AAAR0015-055.

- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing (version 4.0.3). Vienna, W, Austria. R Foundation for Statistical Computing.
- Resler, L. M., D. R. Butler and G. P. Malanson. 2005. Topographic shelter and conifer establishment and mortality in an alpine environment, Glacier National Park, Montana. *Physical Geography* 26(2):112-125. Doi: 10.2747/0272-3646.26.2.112.
- Rubio-Cuadrado, Á., C. Gómez, J. Rodríguez-Calcerrada, R. Perea, ... and L. Gil. 2021. Differential response of oak and beech to late frost damage: an integrated analysis from organ to forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 297:108243. Doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108243.
- Schad, P. 2023. World Reference Base for Soil Resources-Its fourth edition and its history. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 186(2):151-163. Doi: 10.1002/jpln.202200417.
- Stahle, D. W., E. R. Cook, D. J. Burnette, J. Villanueva, ... and I. M. Howard. 2016. The Mexican drought atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews* 149:34-60. Doi: 10.1016/j.quascirev.2016.06.018.
- Sundqvist, M. K., N. J. Sanders and D. A. Wardle. 2013. Community and ecosystem responses to elevational gradients: Processes, mechanisms, and insights for global change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 44:261-280. Doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110512-135750.
- Urrutia-Jalabert, R., J. Barichivich, V. Rozas, A. Lara, ... and E. Cuq. 2021. Climate response and drought resilience of *Nothofagus obliqua* secondary forests across a latitudinal gradient in south-central Chile. *Forest Ecology and Management* 485:118962. Doi: 10.1016/j.foreco.2021.118962.
- Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería and J. I. López-Moreno. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23(7):1696-1718. Doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.

Vitali, A., J. J. Camarero, M. Garbarino, A. Piermattei and C. Urbinati. 2017. Deconstructing human-shaped treelines: Microsite topography and distance to seed source control *Pinus nigra* colonization of treeless areas in the Italian Apennines. *Forest Ecology and Management* 406:37-45. Doi: 10.1016/j.foreco.2017.10.004.

VoorTech Consulting. 2021. The tree ring measuring program project J2X. (V5.03). Holderness, NH, United States of America. VoorTech. <http://www.voortech.com/projectj2x/>. (22 de septiembre de 2023).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 [Atribución-No Comercial \(CC BY-NC 4.0 Internacional\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.