

Influencia del Déficit de Presión de Vapor en el crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii*

Influence of Vapor Pressure Deficit on the annual growth of *Pseudotsuga menziesii*

Julián Cerano-Paredes^{1*}, Areli Avendaño-González¹, Jesús Arcadio Muñoz-Villalobos², Rosalinda Cervantes-Martínez³, Sergio Jiménez-Jiménez¹, Eladio Heriberto Cornejo-Oviedo³

¹INIFAP CENID-RASPA. Km 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

²INIFAP CIRNOC-C.E. Delicias, Km 2 Carretera Delicias Sacramento, Cd. Delicias, Chihuahua.

³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento Forestal. Calzada Antonio Narro núm. 1923. C. P. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila.

*Autor para correspondencia: cerano.julian@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar la relación entre el crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y el Déficit de Presión de Vapor (DPV) en la Sierra Madre Oriental (SMOr). Se seleccionaron 123 árboles en cuatro sitios diferentes, Sierra Las Alazanas (LAS), Sierra La Viga (LVA), Sierra La Marta (LMA) y Sierra El Tarillal (ETL), se extrajeron 380 muestras con el apoyo de taladro de Pressler. Cada una de las muestras se analizó y fechó con base en técnicas dendrocronológicas estándar. Se fechó el 98.68% de las muestras con el apoyo del programa COFECHA y se generaron cuatro diferentes cronologías para lo cual se usó el programa ARSTAN. Un análisis de componentes principales (ACP) indicó variabilidad común entre las series y se desarrolló una cronología regional con una extensión de 313 años (1710 - 2022), la cual indica una correlación entre series de $r = 0.669$ ($p < 0.01$) y una sensibilidad media de 0.301. Registros climáticos se extrajeron de la plataforma ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis, los cuales comprendieron el periodo de 1950 a 2022 (73 años). Los datos climáticos se correlacionaron con los índices de ancho de anillo. El análisis de función de respuesta indica que, el DPV modula de manera negativa y altamente significativa ($r = -0.6649$; $p < 0.01$) el crecimiento de la especie para esta región de la SMOr. Dicha variable tiene potencial para ser reconstruida y extender sus registros con base a las cronologías de esta especie.

Palabras clave: Sierra Madre Oriental, dendroclimatología, anillo de crecimiento, déficit de presión de vapor.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the relationship between the growths of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco and the Vapor Pressure Deficit (VPD) in the Sierra Madre Oriental (SMOr). Were selected 123 trees in four different sites, Sierra Las Alazanas (LAS), Sierra La Viga (LVA), Sierra La Marta (LMA) and Sierra El Tarillal (ETL), 380 samples were extracted with the help of a Pressler increment borer. Each of the samples was analyzed and dated based on standard dendrochronological techniques. The 98.68% of the samples were dated with the help of the COFECHA program and four different chronologies were generated for which the ARSTAN program was used. A principal component analysis (PCA) indicated common variability among the series and a regional chronology with an extension of 313 years (1710 - 2022) was developed, which indicates a correlation between series of $r = 0.669$ ($p < 0.01$) and a mean sensitivity of 0.301. Climatic records were extracted from the ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis platform, which covered the period from 1950 to 2022 (73 years). The climatic data were correlated with the ring width indices. The response function analysis indicates that the DPV modulates in a negative and highly significant way ($r = -0.6649$; $p < 0.01$) the growth of the species for this region of the SMOr. This variable has the potential to be reconstructed and its records extended based on the chronologies of this species.



Keywords: Sierra Madre Oriental, dendroclimatology, growth ring, vapor pressure deficit.

INTRODUCCIÓN

Los bosques templados de la Sierra Madre Oriental (SMOr) y Sierra Madre Occidental (SMOc) tienen entre sus componentes especies arbóreas de coníferas con excelente potencial dendrocronológico (Stahle et al., 1998).

Una especie altamente sensible a la variabilidad climática es *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Herman y Lavander, 1990; Villanueva-Díaz et al., 2008). La especie posee un gran potencial dendrocronológico (Cerano-Paredes et al., 2009), por ello es de amplio uso en el desarrollo de series paleoclimáticas en México y otras partes del mundo (Stahle et al., 2000; Cleaveland et al., 2003).

De las diferentes variables climáticas que se han analizado para conocer su influencia en el crecimiento de diferentes especies arbóreas, no existe conocimiento sobre el impacto del Déficit de Presión de Vapor (DPV) en el crecimiento de *P. menziesii* en México.

El DPV es la diferencia entre la cantidad de humedad en el aire y la cantidad de humedad que el aire puede contener cuando está saturado, dependiendo esta última de la temperatura ambiente. Refleja el efecto de la temperatura y la precipitación sobre la humedad relativa y la demanda de transpiración, lo que estimula el cierre de las estomas para minimizar la pérdida de agua, por lo tanto, el flujo de agua y nutrientes del suelo a través de las plantas, en última instancia, a la atmósfera (Broz et al., 2021).

El DPV puede limitar el crecimiento de los árboles (Breshears et al., 2013; Williams et al., 2013; Allen et al., 2015), sin embargo, su importancia no ha sido del todo reconocida (Lendzion y Leuschner, 2008).

Ante los escenarios de cambio climático que indican cambios importantes en la variabilidad de las temperaturas y precipitaciones, cambios que pueden llegar a afectar el crecimiento y desarrollo de las especies arbóreas, principalmente a esta especie objeto de estudio con una distribución muy restringida. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo de investigación fue, determinar la relación entre el crecimiento de *P. menziesii* y el DPV.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los sitios de estudio se localizan en la SMOr, en cuyo macizo montañoso se obtuvieron muestras de *P. menziesii* de cuatro localidades diferentes, Sierra

Las Alazanas (LAS), Sierra La Viga (LVA), Sierra La Marta (LMA) y Sierra El Tarillal (ETL) (Figura 1).

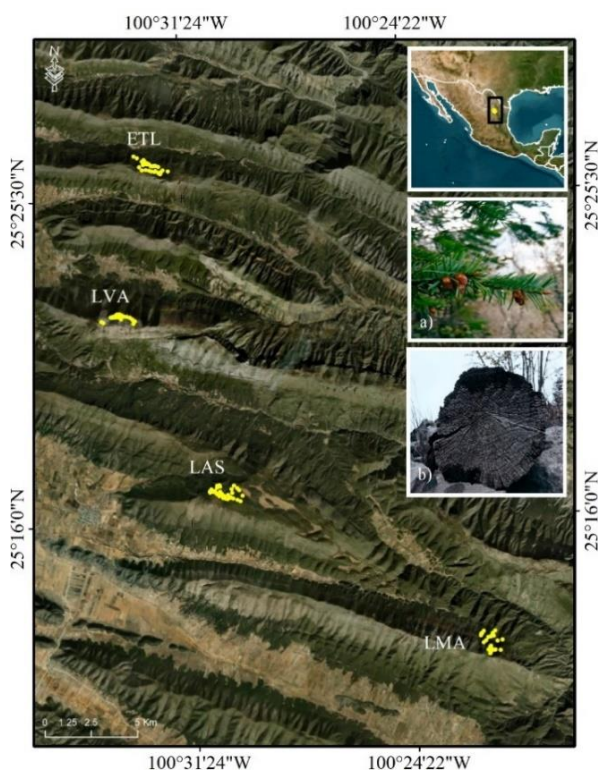


Figura 1. Distribución de los sitios muestreados para la generación de cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la Sierra Madre Oriental.

Métodos de campo

El sistema de muestreo empleado en cada uno de los sitios de estudio fue, un muestreo selectivo. Se seleccionaron árboles longevos en la medida de lo posible, libres de daños mecánicos, plagas y enfermedades (Cerano-Paredes et al., 2022). A cada árbol se le extrajeron tres virutas a diferente altura del fuste. Las muestras se extrajeron con el apoyo de un taladro de Pressler de diferentes dimensiones y diámetro de 5.15 mm.

Métodos de laboratorio

Las muestras se prepararon en el laboratorio para su análisis, se montaron en molduras de madera para dar mayor firmeza y resistencia a los núcleos de crecimiento durante el proceso de pulido y fechado (Figura 2a).



Figura 2. a) Muestra los anillos de crecimiento posterior al proceso de pulido, b y c) indican el sistema de medición Velmex y la forma en que se realiza la medición del ancho de los crecimientos anuales.

Cada uno de los anillos de crecimiento fue fechado al año exacto de formación mediante la técnica dendrocronológica estándar denominada “fechado cruzado” (crossdating, en inglés), principio de la dendrocronología que permite determinar el año exacto de formación de cada anillo con base en la similitud de los patrones de crecimiento (Stokes y Smiley, 1996).

Una vez fechadas las muestras, cada anillo anual de crecimiento se midió individualmente empleando un sistema de medición VELMEX con precisión de 0.001 mm (Figura 2c). Este sistema está conectado a una computadora que utiliza el programa Measure J2X versión 4.2 para registrar las mediciones de ancho de anillo (Figura 2b) (Robinson y Evans, 1980).

Análisis de datos

El fechado y exactitud de la medición de cada anillo, se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN, el cual inserta la curva de mejor ajuste al crecimiento de cada árbol y luego divide el valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva (Cook y Holmes, 1984). Se genera una serie de índices normalizados (cronologías) con media 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987; Fritts, 2001). Este procedimiento se repitió para cada una de las diferentes muestras de los árboles y finalmente el promedio de todas las series estandarizadas permitió generar la cronología para cada uno de los sitios de estudio.

Se corrió un análisis de correlación de Pearson para determinar si las series registraban una misma variabilidad en su crecimiento. Adicionalmente, se corrió un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) para el período común de las cuatro cronologías (145 años; 1877-2022), lo anterior para determinar el porcentaje de variabilidad común entre las series.

Obtención de datos climáticos

Para determinar la influencia del DPV en el crecimiento de *P. menziesii*, se descargaron registros climáticos de la plataforma ERA5-Land Monthly Aggregated - ECMWF Climate Reanalysis (Muñoz, 2019). Dichos valores fueron extraídos de forma mensual para el periodo de 1950 a 2022 (73 años) para cada uno de los cuatro sitios.

El DPV se determinó empleando las ecuaciones de evapotranspiración (ET), que se estima comúnmente considerando la evapotranspiración de referencia (ET₀) y el coeficiente de la especie a estudiar (K_c). La primera se puede calcular usando el manual 56 de la FAO (Allen et al., 2006). Siendo el método de Penman Monteith el más usado por su buena precisión para diferentes condiciones climáticas y regiones.

Correlación de Pearson

Se realizaron pruebas estadísticas de correlación de Pearson entre la cronología residual del anillo total, madera temprana y madera tardía con el DPV, esto con la finalidad de observar qué periodo del año (mensual, bimensual, estacional o acumulado) influye más en el crecimiento de *P. menziesii*.

Generación de modelos de regresión

Finalmente, con el fin de conocer el potencial dendrocronológico de la especie para reconstruir el DPV, se corrieron modelos de regresión lineal simple tomando como variable independiente las cronologías y como variable dependiente al DPV, utilizando el programa STATISTICA Kernel Release 5.5 (Stat Soft Inc, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fechado de muestras

De un total de 380 núcleos de crecimiento extraídos de 123 árboles de *P. menziesii* (tres muestras por árbol, aproximadamente) colectados en cuatro diferentes localidades de la SMOr, se lograron fechar

375 muestras, que representan el 98.68% del total, el 1.32% restante no fue posible fechar por registrar problemas de crecimiento propiciados por las condiciones locales (competencia, liberaciones, incendios, plagas y enfermedades, entre otros).

El éxito en el fechado de las muestras depende de las condiciones del sitio donde crecen los árboles y esto puede propiciar que el fechado de muestras varía de un 43 a un 90% (Villalba, 1990; Lara y Villalba, 1993).

Se halló una correlación altamente significativa entre series para cada uno de los cuatro diferentes sitios de trabajo, los valores mínimos de r fueron de 0.673 ($p < 0.01$) y máximos fueron de $r = 0.793$ ($p < 0.01$), citados valores que superan el mínimo significativo ($r = 0.3281$, $p < 0.01$) establecido por el programa de control de calidad COFECHA (Holmes, 1983).

Aunque la serie más extensa alcanza poco más de tres siglos de longitud en este estudio, el mayor número de muestras cubre el periodo de 1900 a 2022. Del año más antiguo, 1710 al año 1800, se encontró la menor representatividad de muestras. Las series que no fueron posible extender hasta el presente (espacios de color gris) atribuible a problemas de crecimiento por la variabilidad climática regional y factores antropogénicos (Figura 3).

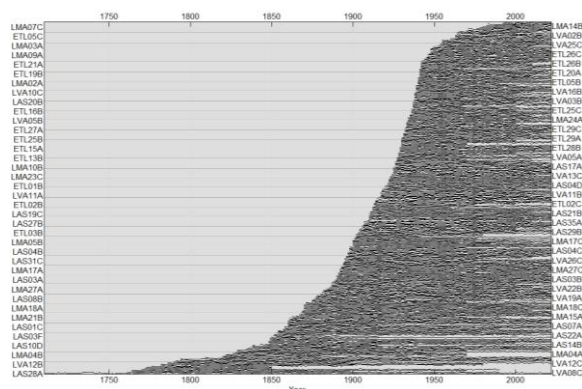


Figura 3. Longitud de cada una de las muestras y el tamaño de muestra que comprende cada uno los segmentos de la cronología regional o de cada muestra colectada de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la Sierra Madre Oriental.

Correlación entre series

El análisis de correlación de Pearson entre series determinó que, las cuatro cronologías presentan una relación altamente significativa ($p < 0.01$) y todas las cronologías presentan una variabilidad anual muy parecida. Un Análisis de Componentes Principales

(ACP) valida lo anterior, ya que todas las cronologías presentan una misma variabilidad, puesto que se agrupan en el componente principal 1 (CP 1) que explicó el 72.14 % de la variabilidad (Figura 4). El componente principal 2 (PC 2) solo explicó el 13.08 % de la variabilidad. Con base en estos resultados, se integraron todas las cronologías en una sola regional para una parte de la Sierra Plegada de la SMO.

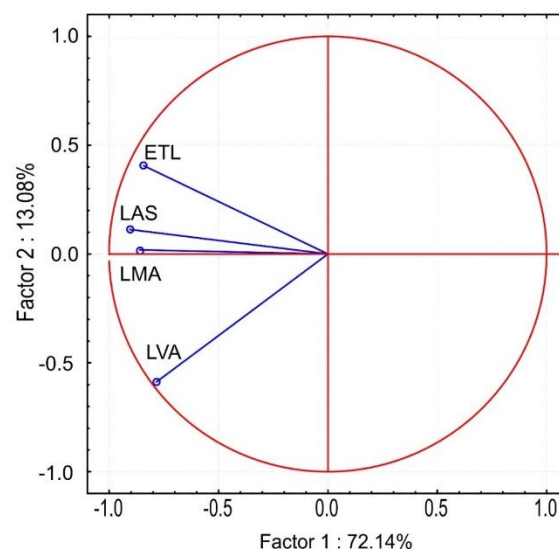


Figura 4. Análisis de componentes principales de las muestras de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la Sierra Madre Oriental. LAS: Sierra Las Alazanas; LVA: Sierra La Viga; LMA: Sierra La Marta; ETL: Sierra El Tarillal.

Resultados similares se reportaron para una región de la SMOc, donde se determinó una variabilidad común entre cronologías de la misma especie separadas por kilómetros, pero en condiciones climáticas comunes (Cerano-Paredes et al. 2012, Villanueva-Díaz et al. 2015). Así mismo para la Sierra Plegada de la SMO se reporta una respuesta común entre cronologías de diferentes especies, atribuible a una variabilidad climática de gran escala (Cerano-Paredes et al. 2011).

Cronología de índice de anillo regional

Se logró desarrollar una cronología regional que comprende el periodo de 1710 a 2022 (313 años). La cronología muestra variabilidad de alta frecuencia (anual), por lo que se definieron periodos con buenas condiciones de humedad (por arriba del promedio) y periodos de importantes sequías (por debajo de media) para la región (Figura 5). La cronología

presenta valores de correlación entre series altamente significativos ($r = 0.669$; $p < 0.01$) y una sensibilidad de 0.301.

Con respecto al tamaño de muestra, la cronología representó un número de muestras de mayor de 300 muestras de 1950 al 2022, en cambio la cronología tuvo como mínimo con 50 muestras,

aproximadamente, hasta 1850. En el intervalo de tiempo de 1710 a 1849 ocurrió un menor número de muestras. El período final o más longevo de la cronología indica mayor variabilidad, lo anterior atribuible al tamaño de muestra (Figura 5).

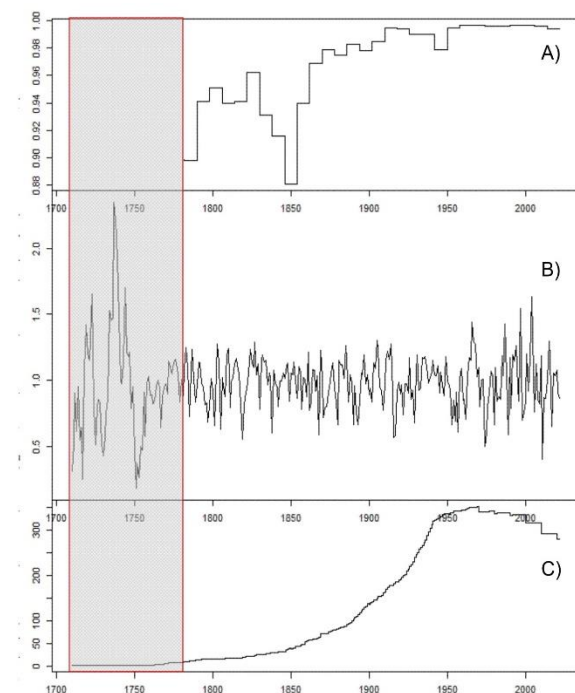


Figura 5. A) análisis estadístico de EPS que indica estadísticamente el período de la cronología sustentado con un tamaño de muestra adecuado para fines de estudios de clima EPS > 0.85. B) Cronología regional de ancho de anillo que muestra la variabilidad climática anual. C) Gráfico de tamaño de muestra que indica la representatividad de la cronología por número de muestras.

El análisis señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés), define estadísticamente la repetición de muestras para cada segmento de la cronología, determinó que el período de la cronología que está representado por un adecuado tamaño de muestra fue el de 1780 a 2022 (Figura 5). Caso similar reportado por Wigley et al. (1984) donde la cronología regional registró un valor de EPS superior a 0.85 después de 1780, lo que generalmente se cita como un umbral aceptable para reconstrucciones dendroclimáticas. Un valor umbral aceptable de EPS es igual o mayor que 0.85 (Wigley et al., 1984). Por lo tanto, la mayor extensión de la cronología está bien representada por el número de muestras para ser considerada en análisis climáticos.

Déficit de Presión de Vapor

El DPV, presentó una respuesta similar para las tres cronologías estándar, residual y arstan de anillo total, correlaciones negativas para todo el período acumulado de enero-diciembre. Se encontró la correlación más alta negativa altamente significativa ($r = -0.6649$; $p < 0.01$) para el período que comprende los meses de enero-junio con la cronología residual de anillo total (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos de regresión que explican la variabilidad y correlación entre los índices de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y el Déficit de Presión de Vapor en la Sierra Madre Oriental.

Variable climática	Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	R	R ²
		Beta	Error típico	Beta			
Déficit de Presión de Vapor	Intercepto	1.2837	0.0478		26.8593		
	Anillo total- Cronología Residual	-0.3597	0.048	-.6649**	-7.5004	-0.6649	0.4421
	Intercepto	1.2402	0.0433		28.6639		
	Madera temprana- Cronología Residual	-0.316	0.0433	-.6549**	-7.3012	-0.6549	0.4288
	Intercepto	1.4704	0.0916		16.0529		
	Madera tardía- Cronología Residual	-0.5567	0.0943	-.5737**	-5.9012	-0.5737	0.3291

La relación del crecimiento de *P. menziesii* con el DPV mostró que, esta variable modula de manera importante el crecimiento. Los valores altos del DPV se relacionaron con índices de crecimiento bajos (Figura 6). Durante los últimos 70 años se determinaron tres años con valores de crecimiento mínimo 1955, 1998 y 2011, que están relacionados con los valores de DPV muy altos 1.92, 1.98 y 1.75 kPa, respectivamente (Figura 6). El año 1998 registra el DPV más alto en los últimos 70 años, alcanzando valores cercanos a los 2.0 kPa.

La temperatura juega un papel importante en los procesos fisiológicos, ya que un incremento en la temperatura puede originar una disminución en la producción de carbohidratos, cuando los árboles en condiciones de alta evapotranspiración capturan menos CO₂, cierran sus estomas, para evitar la pérdida de agua (Pallardy, 2010).

A medida que aumenta la temperatura aumenta el VPD en las acículas, a una temperatura de 25°C el VPD alcanza los 2.0 KPa y sigue aumentando con el incremento de la temperatura, al aumentar estos parámetros, se reduce la conductancia estomática (salida de agua y entrada de CO₂ de los estomas) y la tasa de fotosíntesis neta es nula a partir de los 30°C y 3.0 KPa de VPD (Leverenz, 1981; Meinzer, 1982), y al haber poca humedad en el aire debido a las altas temperaturas y las bajas precipitaciones, el árbol cierra los estomas para evitar la pérdida de agua por transpiración (Barceló et al., 2001).

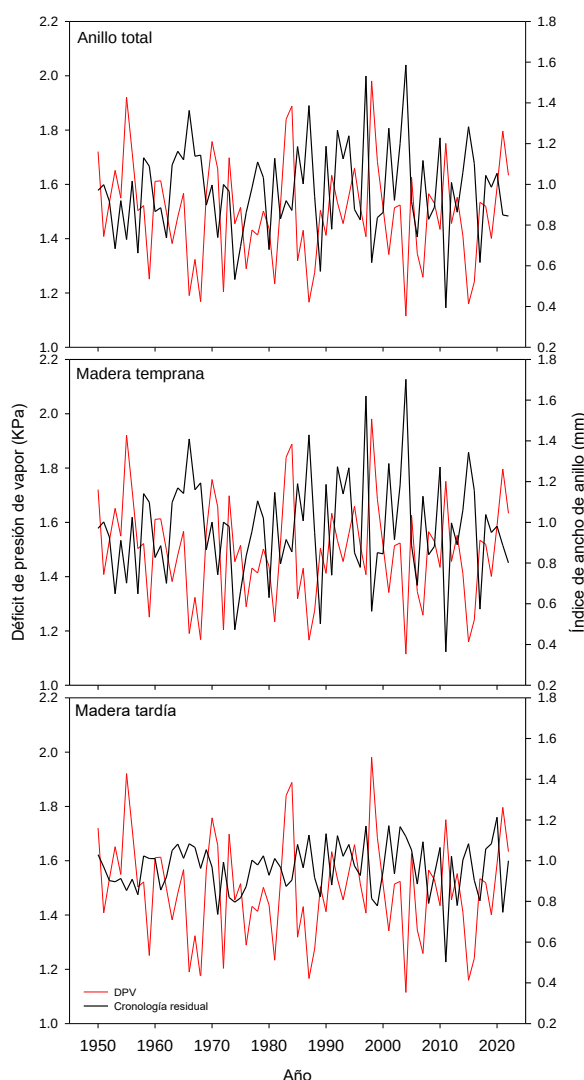


Figura 6. Relación del Déficit de Presión de Vapor con el anillo total, madera temprana y madera tardía de la cronología residual de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Sierra en la Sierra Madre Oriental.

CONCLUSIONES

Este trabajo ha generado conocimiento sobre la influencia del DPV en el crecimiento de *P. menziesii*, y representa un primer acercamiento sobre el análisis de la influencia del DPV. Es el primer trabajo que reporta la relación DPV-crecimiento para esta especie en México.

El DPV modula de manera negativa altamente significativa el crecimiento de *P. menziesii* para esta región de la SMOr. Estos resultados son de gran relevancia ante los escenarios de cambio climático, los cuales pronostican mayores temperaturas y

menor humedad para esta región del país, lo cual podría traer serios problemas para el crecimiento y permanencia de esta especie, que a la fecha ya registra una distribución restringida.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento por parte del proyecto "Reconstrucción de regímenes históricos de incendios forestales en México: Ecología del fuego para el manejo forestal sustentable" con número de SIGI: 1123336382.

LITERATURA CITADA

- Allen, C. D., Breshears, D. D., and McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), 1-55. DOI:10.1890/ES15-00203.1.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (2006). *Crop evapotranspiration: guidelines for determining crop water requirements*. Roma, FAO, 298(0).
- Barceló, J. B., Nicolás, G., Sabater, B., y Sánchez, R. (2001). *Fisiología vegetal*. Madrid, España: Ediciones Pirámide. 568.
- Breshears, D. D., Adams, H. D., Eamus, D., McDowell, N. G., Law, D. J., Will, R. E., Williams, A. P., and Zou, C. B. (2013). The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off. *Frontiers in Plant Science*, 4, 266.
- Broz, A., Retallack, G. J., Maxwell, T. M., and Silva, L. C. R. (2021). A record of vapour pressure deficit preserved in wood and soil across biomes. *Scientific Reports*, 11, 662.
- Cerano-Paredes, J., Szejner, P., Gutiérrez-García, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Villanueva-Díaz, J., Estrada-Arellano, J. R., Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., and Castruita-Esparza, L. U. (2022). How to Extract Climate Variability from Tree-Rings. *Journal of visualized experiments*, JoVE, 181. DOI:10.3791/63414.



- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Arreola, A. J. G., Sánchez C. I., y Valdez C. R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez, C. R. D., Constante, G. V., González, B. J. L., y Estrada A. J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la Cuenca del Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 07-23.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez, C. R. D., Cornejo, O. E. H., Sánchez, C. I., y Constante, G. V. (2011). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el Sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 31-45.
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Díaz, J., and Burns, B. T. (2003). Tree-Ring Reconstructed Precipitation and Tropical Teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369-388.
- Cook, E. R. (1987). The Decomposition of Tree-Ring Series For Environmental Studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37-59.
- Cook, E. R. and Holmes, R. H. (1984). Program ARSTAN and users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, Arizona, EUA. 15.
- Fritts, H. C. (2001). *Tree-rings and climate*. Blackburn Press, Caldwell. New Jersey. 567.
- Hermann, R. K. and Lavender, D. P. (1990). *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Douglas fir in Burns, R.B., Honkala, B.H. (technical coordinators), *Silvics of North America: 1. Conifers* (Agriculture Handbook 654), U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, D.C.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree- ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- Lara, A. and Villalba, R. (1993). A 3620-Year Temperature Reconstruction from Fitzroya cupressoides Tree Rings in Southern South America. *Science*, 260(5111), 1104-1106. DOI:10.1126/science.260.5111.1104.
- Lendzion, J. and Leuschner, C. (2008). Growth of European beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings is limited by elevated atmospheric vapour pressure deficits. *Forest Ecology and Management*, 256(4), 648-655.
- Leverenz, J. W. (1981). Photosynthesis and transpiration in large forest-grown Douglas-fir: Diurnal variation. *Canadian Journal of Botanic*, 59(3), 349-356.
- Meinzer, F. C. (1982). The effect of vapor pressure on stomatal control of gas exchange in Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) saplings. *Oecologia*, 54, 236-242.
- Muñoz, S. J. (2019). ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI:10.24381/cds.68d2bb30.
- Pallardy, S. G. (2010). *Physiology of woody plants*. (3ra ed.). Academic Press.
- Robinson, W. J. and Evans, R. (1980). A Microcomputer-Based Tree-Ring Measuring System. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59-64.
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., Cole, J. E., Dunbar, R. B., Therrell, M. D., Gay, D. A., Moore, M. D., Stokes, M. A., Burns, B. T., Villanueva-Díaz, J., and Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152.
- Stahle, D. W., Villanueva-Díaz, J., Cleaveland, M. K., Therrell, M. D., Paull, G. J., Burns, B. T., Salinas, W., Suzan, H., and Fule, P. Z. (2000). Recent Tree-Ring Research in Mexico, *Dendrocronología en América Latina*, Editorial de la Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina. 285-305.
- Stat Soft Inc. (2000). *STATISTICA Software, Kernel version 5.5 A. 1984-2000*. Tulsa, Oklahoma, EUA.
- Stokes, M. A. and Smiley, T. L. (1996). *An introduction to the tree-ring dating*. University of Arizona Press. 73.
- Villalba, R. (1990). Climatic fluctuations in northern Patagonia during the last 1000 years as inferred from tree-ring records. *Quaternary Research* 34(3), 346-360. DOI:10.1016/0033-5894(90)90046-N.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés, M. C., Vázquez, S. L., Yocom, L. L., y Ruiz-Corral, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos



- de árboles. Investigaciones geográficas, (87), 141-153. DOI:10.14350/rig.44485.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D. W., Estrada, A. J., y Constante, G. V. (2008). Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y reconstrucciones de precipitación y flujo en México. Folleto Científico No. 23. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. 49.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., and Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. J Clim Appl Meteorol, 23, 201-213.
- Williams, A. P., Allen, C. D., Macalady, A. K., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Swetnam, T. W., Rauscher, S. A., Seager, R., Grissino-Mayer, H. D., Dean, J. S., Cook, E. R., Gangodagamage, C., Cai, M., and McDowell, N. G. (2013). Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. Nature Climate Change, 3, 292-297. DOI:10.1038/NCLIMATE1693.