



Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana

Climatic sensibility of three dendrochronological indexes for a Mexican conifer

Marín Pompa-García¹, Raymundo Dávalos-Sotelo², Efraín Rodríguez-Téllez³, Oscar A. Aguirre-Calderón⁴
y Eduardo J. Treviño-Garza⁵

* Autor de correspondencia.

¹ Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. mpgarcia@ujed.mx

² Red de Ambiente y Sustentabilidad. Instituto de Ecología, A.C. raymundo.davalos@inecol.edu.mx

³ Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Laboratorio de Hidrobiología, Departamento Forestal. efrainrodriguezr@hotmail.com

^{4,5} Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx; eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Estudios recientes han sugerido que las variaciones climáticas tendrán implicaciones en la biogeografía de los ecosistemas. La dendrocronología representa una herramienta útil para analizar las relaciones clima - árbol. Los anillos de crecimiento usualmente son estandarizados antes del proceso de análisis para disminuir el sesgo causado por los efectos relacionados con el tamaño y la edad del árbol en lo individual. Este proceso produce índices que conservan las señales climáticas comunes en una sola cronología. Sin embargo en aplicaciones dendro-climáticas, pocos estudios documentan su capacidad sensitiva y su selección se puede tornar rutinaria sin diferenciar sus implicaciones. El objetivo de este trabajo fue comparar la sensibilidad climática de tres series dendrocronológicas de *Pinus cooperi*: Estándar (*Sd*), Residual (*Rd*), y Arstan (*Ar*). Dichas series se asociaron con datos históricos de precipitación, temperaturas, así como dos índices de patrones atmosféricos circulatorios ENSO (Niño3 y MEI). Todas las cronologías mostraron tendencias similares durante los meses de agosto a diciembre del año previo al crecimiento. No obstante, la *Rd* extendió su respuesta a signos climáticos del año actual, pero fue deficiente con ENSO. Comparativamente la *Sd* y la *Ar* destacaron su sensibilidad a fenómenos ENSO en periodos previos al crecimiento. Se concluye que la debida selección de la versión de las series dendrocronológicas es importante en interpretaciones de escenarios climáticos. Tampoco se deben considerar substitutas entre sí. Su complementación con otras herramientas mejoraría la capacidad sensitiva de los procesos ecológicos que ocurren en el bosque.

PALABRAS CLAVE: anillos de crecimiento, biogeografía, Durango, estandarización, *Pinus cooperi*.

ABSTRACT

Recent studies have suggested that climatic variations may have implications on ecosystem biogeography. Dendrochronological techniques constitute a useful tool to analyze relationships tree growth-climate. Ring widths usually are standardized before the analysis in order to remove unwanted bias due to individual growth related to stem size and age. This approach produces rings widths indices while retaining climatic signals that are in common among trees into a single chronology. However, in dendroclimatology few papers show their sensitive capacity. As a result its use could be becomes routine practice without considering their implications. The aim of this work was to assess the climate sensitivity responses of three chronologies indexes of *Pinus cooperi*: Standard (*Sd*), Residual (*Rd*), and Arstan. Such series were correlated with historical records of precipitation, temperature and two index El Niño-Southern Oscillation ENSO (Niño3 and MEI). The three chronologies showed similar trends during previous growing months (August to December). Nevertheless, *Rd* was better associated with current growing months, but showed weaker correlation with ENSO. Comparatively *Sd* and *Ar* demonstrated stronger sensibility to large-scale climatic patterns in previous growing months. It is concluded that appropriate selection of dendro-chronology index is important, indicating repercussions on climatic scenarios. Neither should be considered substitutes for each other. Combining them with complementary tools would improve the sensitivity capacity of ecological processes in the forest.

KEY WORDS: Tree rings, biogeography, Durango, standardization, *Pinus cooperi*.

INTRODUCCIÓN

En dendrocronología es común crear una función media como el estimador de la señal climática de un árbol para un sitio dado (Fritts, 2001). Este proceso conocido como estandarización, elimina el efecto inherente a la edad y a la geometría del árbol incrementando la calidad de la señal (Cook, 1987). Usualmente se generan tres versiones de índices dendrocronológicos conocidos como índice de ancho de anillos: Estándar (*Sd*), Residual (*Rd*), y Arstan (*Ar*) (Cook y Holmes, 1986). Sin embargo, raramente se documentan las implicaciones dendro-climáticas de usar uno u otro, haciendo su selección rutinaria.

En varias investigaciones se ha modelado la sensibilidad de especies forestales a fenómenos climáticos (Adams y Kolb, 2005; González-Elizondo *et al.*, 2005; Candel Pérez *et al.*, 2012), incluyendo asociaciones con patrones circulatorios de gran escala (i.e. el Niño) (Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano *et al.*, 2011; Rozas y García-González, 2013). Todos estos estudios han basado sus correlaciones en índices dendrocronológicos; sin embargo, no se ha documentado una comparación de la utilidad de las diferentes versiones dendrocronológicas, asumiendo la misma sensibilidad ante la señal climática.

Recientes estudios sugieren que los ecosistemas forestales estarán en riesgo a consecuencia de las variaciones climáticas (Seager *et al.*, 2007; Williams *et al.*, 2012). Entender las repercusiones de estas en la composición y estructura de la vegetación es una preocupación constante (Lo *et al.*, 2010; Candel-Pérez *et al.*, 2012). Las relaciones clima - árbol constituyen un aspecto clave para predecir los impactos de las variaciones climáticas en las comunidades vegetales (Beniston, 2002). Particularmente ello recobra importancia ecológica en aquellas especies representativas de ecosistemas forestales.

Pinus cooperi es una especie endémica y dominante en la Sierra Madre Occidental (García y González, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2007; Cruz *et al.*, 2008; González-Elizondo *et al.*, 2013). Su amplitud ecológica provee una buena oportunidad de evaluar su potencial dendro-climático en función de la sensibilidad de los diferentes índices de anillos. Esta especie ha sido identificada como

una con potencial para reconstruir la variabilidad climática del norte de México (Cerano *et al.*, 2012). Conocer las implicaciones de utilizar cada serie dendrocronológica representa información valiosa para monitorear la sensibilidad climática ante diversos escenarios climáticos y ecológicos (Viveros-Viveros *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2012).

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue analizar la sensibilidad de tres versiones de una serie dendrocronológica, ante variables climáticas asociadas al crecimiento radial de *Pinus cooperi*. Se plantea como hipótesis que hay una respuesta diferenciada de los índices de anillo a los signos climáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La zona de estudio se localizó en la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, México, en las coordenadas extremas 24°8'30" N, 105°3'25" W, y 24°4'40" N, 105°1'15" W (Fig. 1). La vegetación de la zona de estudio se compone de *Pinus cooperi*, *Pinus duranguensis*, *Pinus arizonica*, *Pinus ayacahuite*, *Pseudotsuga menziesii*, *Abies durangensis*, *Arbutus xalapensis* y varias especies de *Quercus* spp. (González-Elizondo *et al.*, 2007; González-Elizondo *et al.*, 2013). El clima es templado semifrío, con un verano fresco sub-húmedo (Pompa, 2012).

Muestreo y construcción de cronologías

Se seleccionaron 10 árboles de *Pinus cooperi* localizados en sitios de pobre calidad de estación, con la misma pendiente y exposición para reducir su efecto en el crecimiento. De cada árbol seleccionado, se tomaron tres muestras de madera por árbol con el apoyo de taladros de Pressler de diferentes dimensiones. Como medida de suficiencia del tamaño de la muestra se usó el estadístico EPS (señal expresada de la población), recomendado para estudios paleoclimáticos (Mérián *et al.*, 2013). Se evitó muestrear árboles dañados y deformes, así como aquellos cuyo crecimiento hubiera estado sujeto a competencia por la luz y nutrientes.

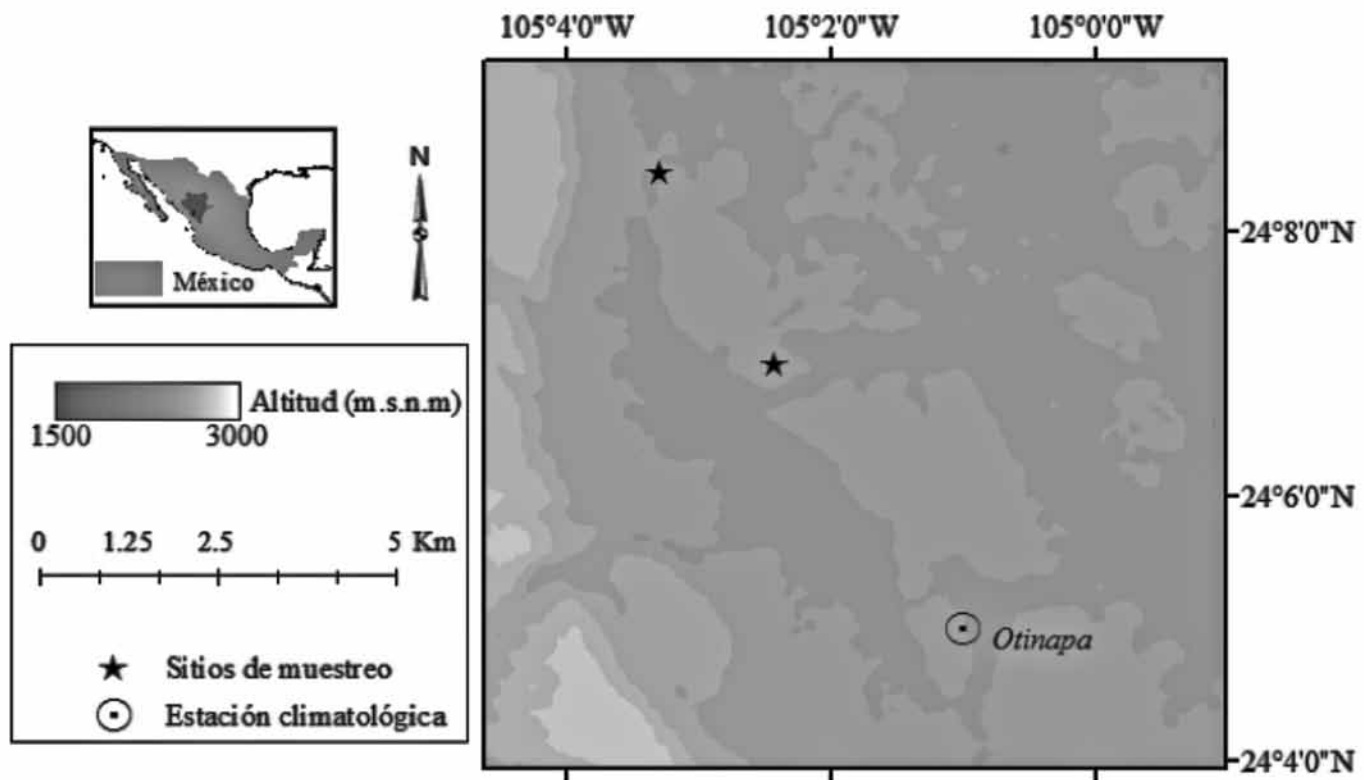


FIGURA 1. Localización del área de estudio mostrando la estación meteorológica más cercana y los sitios donde fueron obtenidas las muestras de *Pinus cooperi*.

Cada uno de los especímenes fue procesado usando procedimientos dendrocronológicos estándar para fechar el año exacto de la formación de los anillos de crecimiento (Stokes y Smiley, 1968). La calidad de las mediciones y el fechado de los datos, fue verificado estadísticamente usando el programa COFECHA (Holmes, 1983).

Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con el clima fueron removidas usando el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1986). Las series primero se ajustaron a una función exponencial negativa y luego a una cúbica *spline* con 50% de frecuencia de respuesta a 64 años. Esto fue suficientemente flexible para reducir la variabilidad no climática, preservando la señal del clima local. De esta forma se generaron tres índices de anillo o cronologías: 1) *Sd*, en la cual los índices de ancho de anillo de cada serie que compone la muestra son promediados estadísticamente; 2) *Rd*, derivada de los valores residuales

provenientes del modelo de auto-regresión (i.e. eliminando la auto-correlación entre anillos); y 3) *Ar*, en la cual se incorporan los coeficientes del modelo de regresión a los valores residuales previamente logrados desde el modelo de auto-regresión.

Datos climáticos y análisis estadístico

Para correlacionar las series dendrocronológicas con las variables climáticas, se utilizaron los datos climáticos disponibles del año 1962 al 2010. La estación meteorológica correspondió a "Otinapa" (CNA, 2012), dada su proximidad a los sitios de muestreo (Fig. 2). En la figura 3 se presenta la serie de tiempo de la temperatura promedio anual y la precipitación anual para el período 1964-2007 para la cual se disponía de datos diarios, obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En la figura 4 se presenta la serie de tiempo para las variables de temperatura

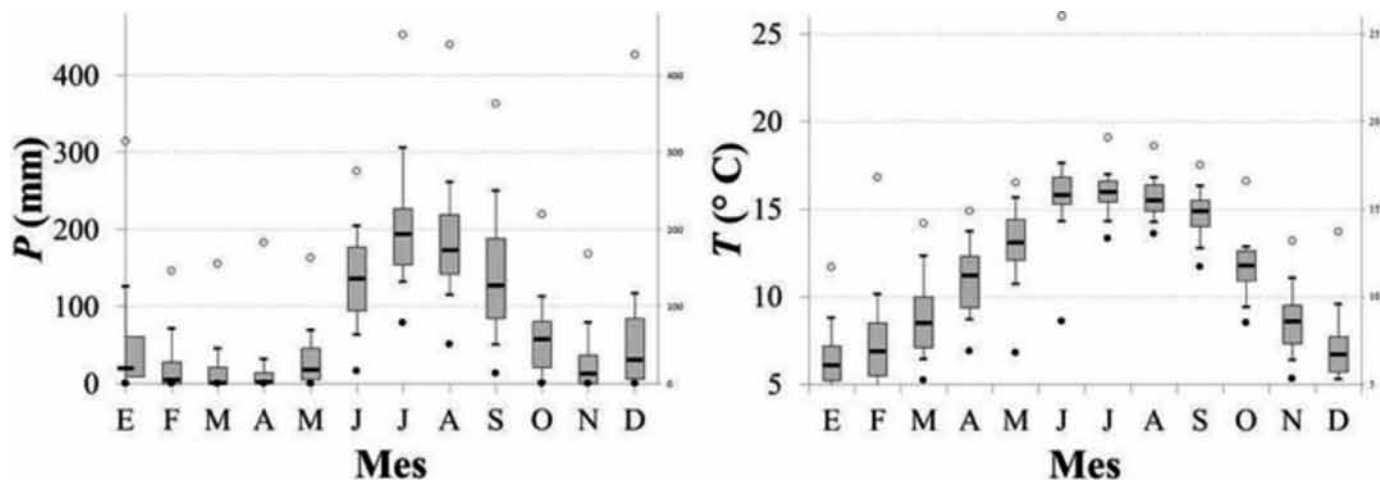


FIGURA 2. Diagramas climáticos de la estación “Otinapa, Durango” (1962-2010). Datos disponibles en CNA (2012).

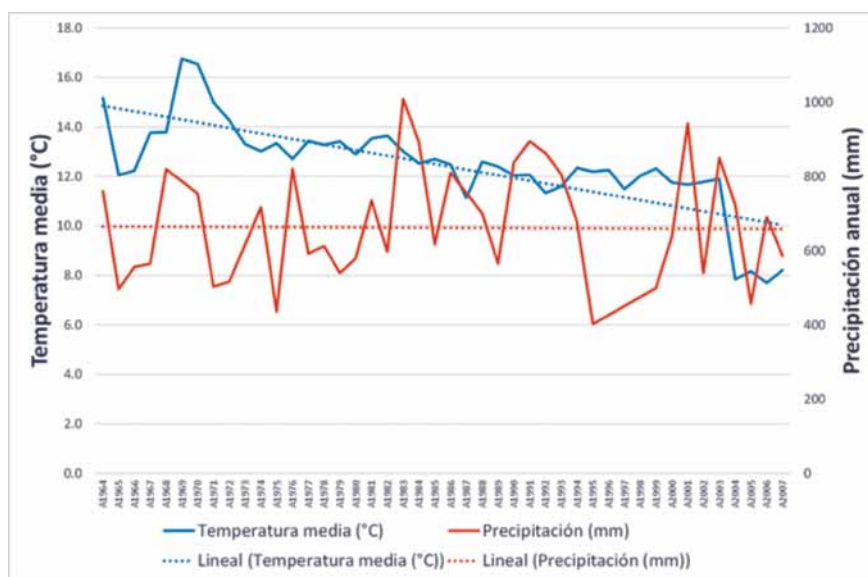


FIGURA 3. Serie de tiempo de datos climáticos de la Estación Otinapa (periodo 1964-2007).

máxima, media y mínima anuales para el mismo período. Se observa que no hay un cambio discernible en la precipitación para esos años, al no haber una tendencia a la alza o a la baja. En cambio, para la temperatura, se detectó una tendencia clara a la disminución de los valores. El modelo planteado aquí debería ser capaz de detectar dichas variaciones. En la figura 5 se muestra la distribución de la temperatura promedio en la zona de estudio y

en la figura 6, la precipitación de la misma región. Se observa que la temperatura aumenta en dirección noreste, apuntando a la región desértica del estado y a zonas más bajas. La temperatura disminuye en dirección a las zonas montañosas. La distribución de la precipitación es consistente con esta información: menor hacia la zona seca (noreste), aumentando en la dirección a las partes altas de la zona de la Sierra Madre Occidental.

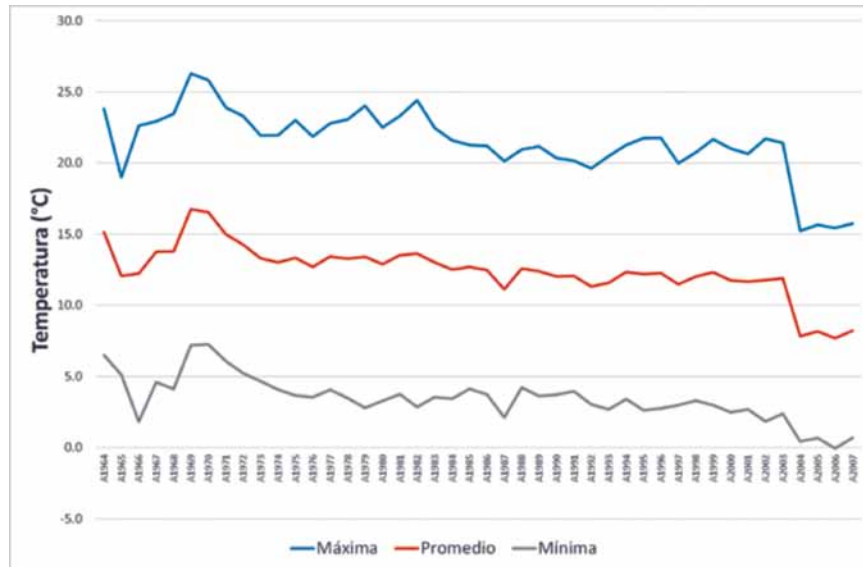


FIGURA 4. Serie de tiempo de datos de temperatura de la Estación Otinapa (periodo 1964-2007).

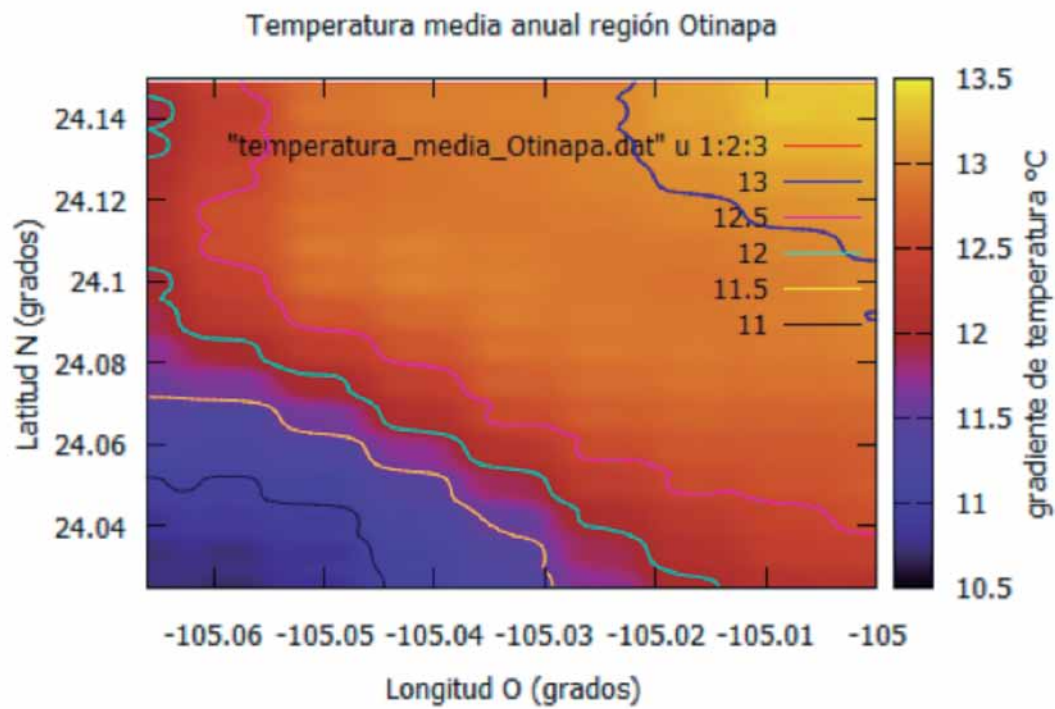


FIGURA 5. Temperatura media anual de la región Otinapa, Dgo.

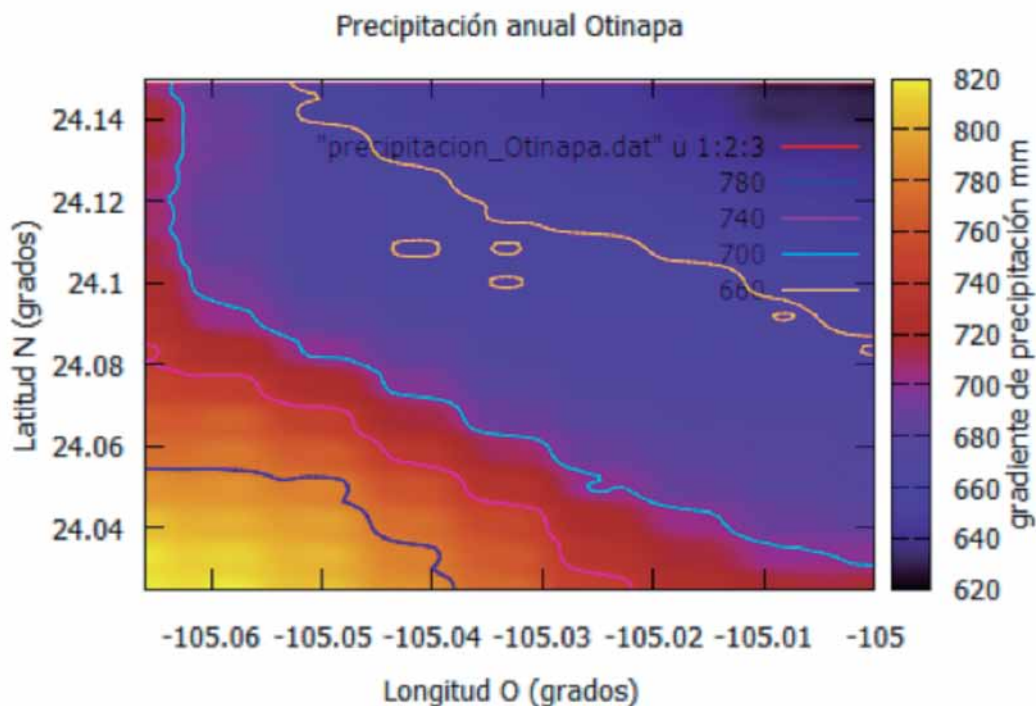


FIGURA 6. Precipitación anual de la región de Otinapa, Dgo.

Los datos para elaborar las figuras 5 y 6 fueron obtenidos del Atlas Climático Digital de México (CCA-UNAM, 2013) y se elaboraron con el *software* de acceso libre *gnuplot* (<http://www.gnuplot.info/>).

Las variables climáticas consideradas en la correlación entre las series dendrocronológicas y las variables climáticas fueron la precipitación mensual total (*PP*) en mm, la temperatura máxima y mínima mensual (*Tmax* y *Tmin*) en °C, así como dos índices de patrones atmosféricos circulatorios conocidos como El Niño Southern Oscillation (ENSO): El Multivariate ENSO index (*MEI*), definido como el principal componente de variación estacional de seis variables océano-atmosféricas en la cuenca tropical del pacífico (Wolter y Timlin 2011). Los datos del *MEI* fueron obtenidos de la página de internet del NOAA Earth System Research Laboratory (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>) para cada uno de los doce meses. Complementariamente, con fines comparativos se usó el *Niño3*, cuyos datos se obtuvieron desde <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/Indices/nino/EXTENDED/>. Este parámetro se define como la diferencia estandarizada de

la presión del nivel del mar entre Tahiti en el Pacífico Este y Darwin al Norte de Australia (Troup, 1965).

Para el periodo 1962-2010, todas las cronologías de anillos fueron correlacionadas con *PP*, *Tmax* y *Tmin* y ENSO (*MEI*, *Niño3*), utilizando el programa DendroClim2002 (Biondi y Waikul, 2004). Este software calcula la significancia estadística de los coeficientes de correlación, con 1000 réplicas de cada dato en un re-muestreo aleatorio.

RESULTADOS

Evaluación de las cronologías de anillos.

La inter-correlación y sensibilidad medias fueron 0,61 y 0,45; respectivamente. La longitud de la cronología fue de 111 años. Los índices de anillos mostraron similares tendencias entre sí, decreciendo por debajo de la media antes de 1920, 1955, 1975, 1980, 1990 y 2000, y ascendiendo de manera sincronizada a partir de 1920, 1930, 1970, 1985 y 2005 (Fig. 7). Ello significó que las series estaban bien replicadas según el estadístico EPS, cuyo valor fue de 0,86.

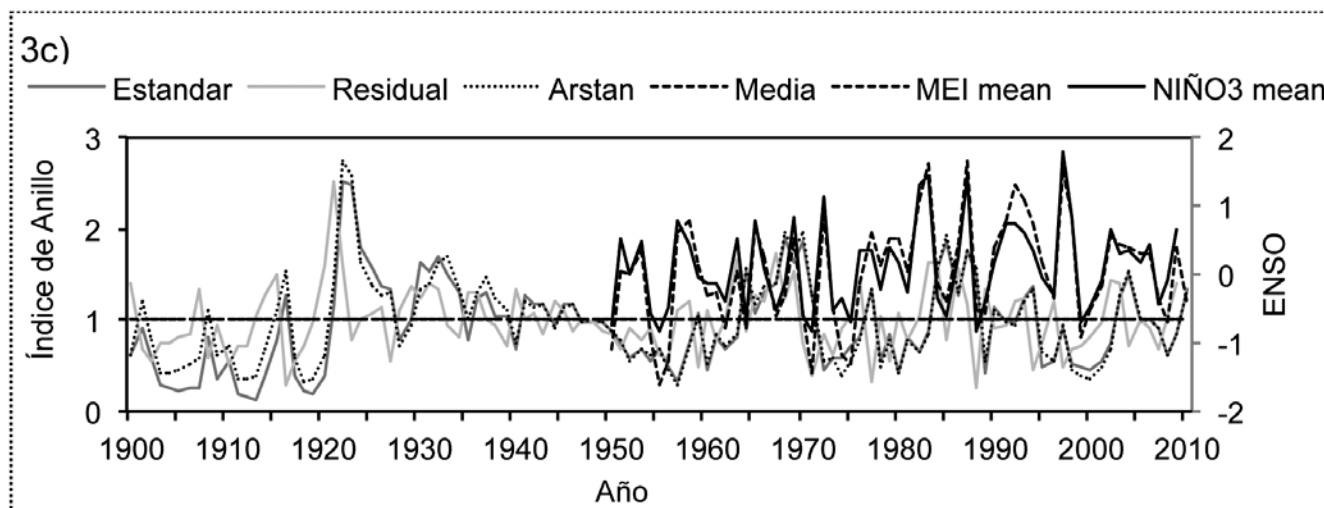
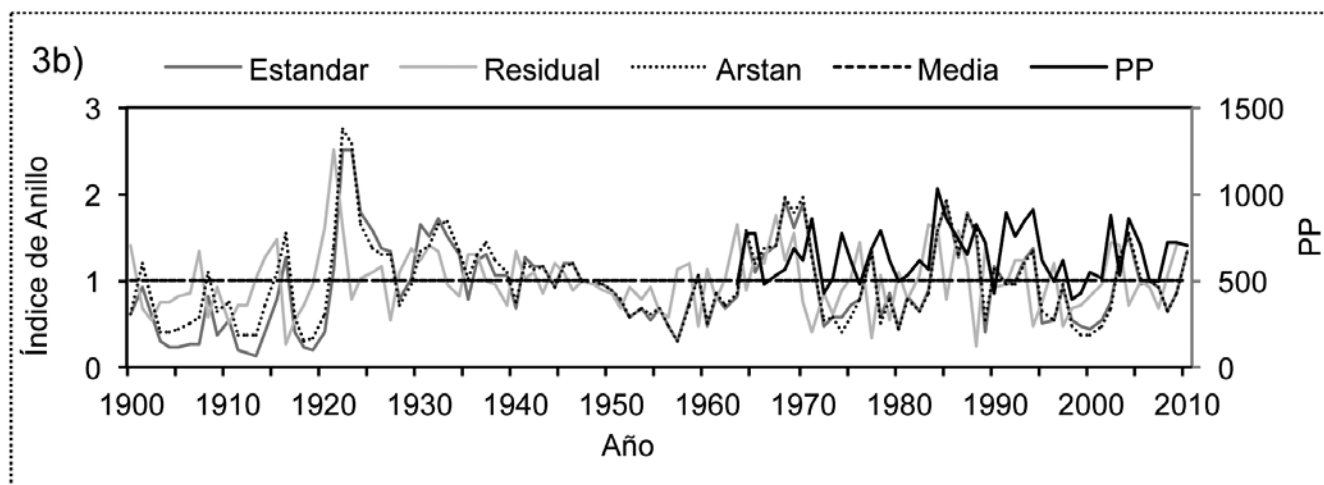
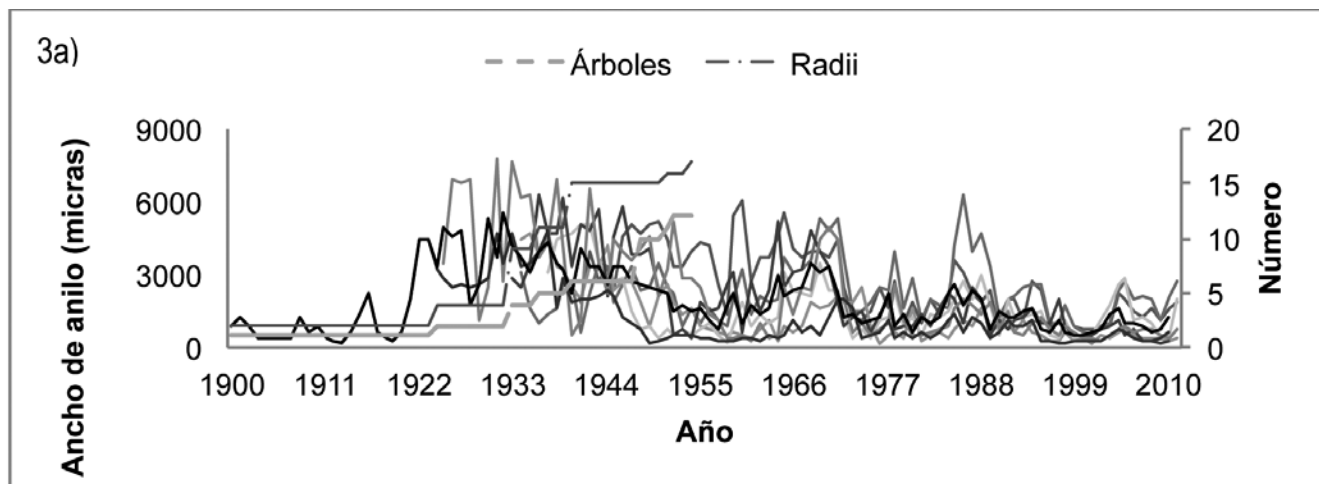


FIGURA 7. Tamaño muestral y anchos de anillo (3a), así como los índices dendrocronológicos generados para *Pinus cooperi* asociados con precipitación (3b) y con ENSO (3c).

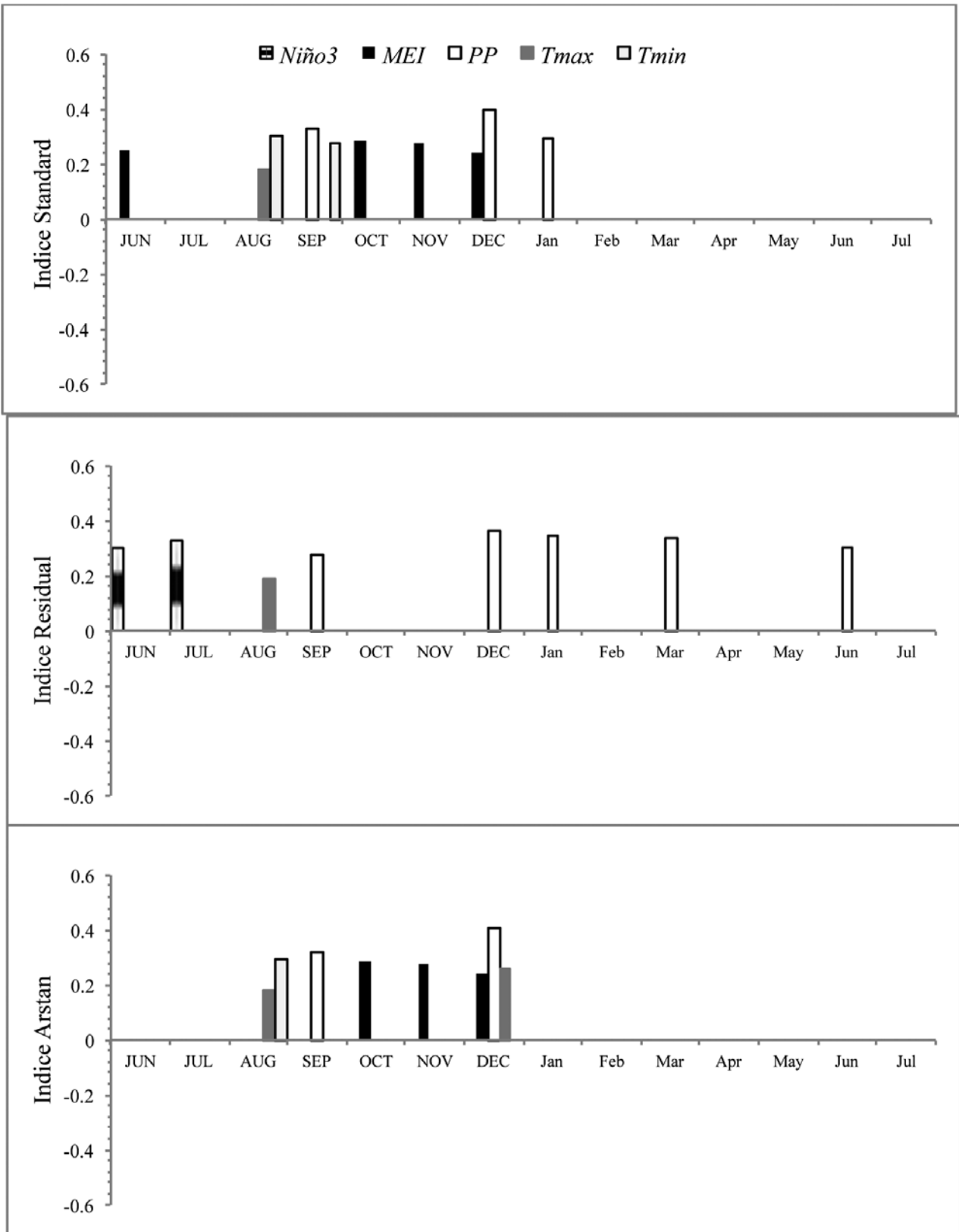


FIGURA 8. Correlaciones de las series dendrocronológicas de *Pinus cooperi* con las variables climáticas de 1962 al 2010 (valores $p < 0.05$ estadísticamente significativos).



Relación de series dendrocronológicas con datos climáticos

El análisis de correlación de los índices con *PP*, *Tmax*, *Tmin* y el *ENSO* mostró asociación positiva y significativa sobre el área de estudio, con coeficientes que variaron de 0 a 0,40 (Fig. 8). Los coeficientes de Pearson (significativos al 0,05) indicaron que la *PP* se correlacionó positivamente para todos los índices de anillo. Para el *Sd* la *PP* tuvo asociación con el mes de septiembre y diciembre del año anterior, y enero del año de crecimiento. Para *Rd*, *PP* se relacionó con mayor amplitud desde septiembre y diciembre del año previo, hasta enero, marzo y junio del año actual. Mientras que para el índice *Ar*, solo lo hizo con septiembre y diciembre del año anterior.

En relación con *Tmax*, se evidenció una asociación menor para *Sd* y *Rd* en agosto del año anterior, mientras que para *Ar* se extendió hasta diciembre del mismo año. Respecto a *Tmin*, solo hubo evidencia de correlación con agosto del año previo para *Ar*, ampliándose a septiembre en *Sd*. Las relaciones con los patrones circulatorios *ENSO* indicaron dos tendencias claramente diferenciadas: *Sd* y *Ar* fueron consistentes con *MEI*, particularmente de octubre a diciembre del año previo, mientras que *Niño3* solo tuvo influencia en *Rd* durante junio y julio del mismo año.

DISCUSIÓN

Los valores de inter-correlación y sensibilidad medias fueron similares a aquellos publicados para cronologías de coníferas creciendo en ecosistemas vecinos (Cleaveland *et al.*, 2003; Santillán *et al.*, 2010). Igualmente, la EPS (> 0,85) proporcionó información confiable como un estimador de la calidad de la señal climática del tamaño de muestra empleado (Mérian *et al.*, 2013). Este análisis comparativo de los índices cronológicos constituyen el primer estudio relativo a *Pinus cooperi*. Aunque se detectaron mínimas diferencias gráficas en las tres versiones, todas ellas mostraron tendencias generales y comparables entre sí. Un periodo de incremento precedido por un decremento en el crecimiento fue notable durante los años 1920s, 1960s, 1980s, 1990s y 2000s. A su vez resultó coincidente con las sequías regionales severas identifica-

das para el área de influencia (Díaz *et al.*, 2002; Therell *et al.*, 2002).

Los resultados de la figura 8 indican que el crecimiento radial de *Pinus cooperi* es influenciado por las lluvias de invierno. Ello resulta coincidente con varios autores que argumentan que la humedad almacenada durante el periodo de latencia (i.e. invierno) constituye una reserva importante para la siguiente estación de crecimiento (Litton *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2010). Adicionalmente, las lluvias del periodo primavera-verano favorecen también el desarrollo radial, como lo detectó la serie *Rd*. Cuando el crecimiento celular ha comenzado, la disponibilidad de humedad es fundamental para activar el metabolismo del árbol y, por ende, su crecimiento. La distribución de carbohidratos es de mayor importancia para la expansión de hojas y raíces, afectando subsecuentemente el crecimiento radial (Misson *et al.*, 2004).

En relación con la asociación positiva de las temperaturas, Lo *et al.* (2010) sugieren que, asociadas con la disponibilidad de agua, contribuyen a extender la estación de crecimiento; por consiguiente el árbol genera más biomasa y por tanto mayor crecimiento. Estos resultados son consistentes con estudios previos en otras coníferas en áreas montañosas (Lebourgeois, *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2010).

Las asociaciones gráficas de las diferentes cronologías con los patrones atmosféricos *ENSO*, mostraron correspondencias cíclicas irregulares (Fig. 7c). Es notable la coherencia entre los índices de anillo y los patrones circulatorios durante el periodo de análisis, en especial en eventos extremos. Para la fase fría (i.e. La Niña) sobresalen los ocurridos en los años 1955, 1964, 1971, 1985, 1988 y 1999. Similarmente y de manera casi sincronizada, se presentan eventos en su fase cálida (i.e. El Niño) durante 1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1972, 1983, 1987, 1991, 1997 y 2002. Estos periodos resultan coincidentes con aquellos mencionados por Cerano *et al.* (2011) para la parte alta de la Cuenca del Río Nazas, reconocida como susceptible a la influencia del *ENSO* por su cercanía al litoral del océano Pacífico.

Diversos estudios han puesto de manifiesto las teleconexiones de ENSO con el crecimiento de anillos en el norte de México (Seager *et al.*, 2009; Méndez and Magaña, 2010; Stahle *et al.*, 2012; Irby *et al.*, 2013). En estos estudios aplicaron al índice convencional de anillos de crecimiento una variable de la base de datos de la oscilación sur o *Niño3*. Según (Wolter y Timlin, 2011) resulta menos confiable respecto al recién desarrollado *MEI*, catalogado como más robusto (ver <http://www.noaa.esrl.noaa.gov/psd/people/klauss.wolter/MEI>). De acuerdo con los resultados de este estudio, la conexión del crecimiento de *P. cooperi* se asocia con los periodos precedentes del crecimiento. ENSO provoca mayores precipitaciones en el norte de México durante su fase cálida (Brienen *et al.*, 2010; Cleaveland *et al.*, 2003). Por ello es notable la asociación del *MEI* en las versiones *Sd* y *Ar*; mientras *Niño3* permanece fijo a su dominio espacial, el *MEI* permite variaciones espaciales con su ciclo estacional mejorando la calidad en sus mediciones (Wolter y Timlin, 2011).

Aunque los tres índices cronológicos revelaron ciertas coincidencias con elementos climáticos del año previo (*Tmax* en agosto y *PP* en septiembre y diciembre), también se observaron diferentes asociaciones. La *Sd* mostró mayor correlación con casi todos los elementos climáticos del año anterior, excluyendo solo al *Niño3*. Dado que esta cronología presenta auto-correlación, su conducta tiene coherencia con lo señalado por Fritts (2001), indicando influencia del crecimiento de un año previo en el siguiente. Esta auto-correlación temporal puede implicar un error estadístico, ya que el cálculo de las probabilidades puede invalidarse. Hart *et al.* (2010), resaltan a esta cronología como la mejor correlacionada con más elementos del clima durante periodos más largos para una conífera en Norteamérica. Similares resultados se describen para bosques boreales a lo largo de gradientes altitudinales, donde las temperaturas de años previos y actuales mostraron correlaciones consistentes con el incremento radial de las especies estudiadas (Huang *et al.* 2010).

En el caso de la serie *Rd* distinguió su correlación en un periodo mayor, en particular para la precipitación,

aunque fue la única sensible al *Niño3*. Esta cronología elimina la correlación del ancho de un anillo de un año determinado con el de años anteriores (Cook y Holmes, 1986). En consecuencia, diversos autores sostienen que presenta una correlación más alta con las variables climáticas, siendo comúnmente utilizada para este tipo de asociaciones (González y Veblen, 2006; Santillan *et al.*, 2010; Bickford *et al.*, 2011). De acuerdo con Fritts (2001), la ausencia de autocorrelación entre los anillos de crecimiento presenta una ventaja para los análisis posteriores de regresión donde se exige este supuesto. Jönsson y Nilsson (2009) destacan sus bondades comparativas, en particular con la asociación entre crecimiento de madera temprana de *Pinus sylvestris* y la precipitación mensual.

Por último, el índice *Ar* exhibió una conducta temporalmente más corta, con asociaciones positivas de agosto a diciembre del año previo, pero similar a la *Sd*. Para Grissino-Meyer *et al.* (1996), esta serie intenta contener las señales climáticas más fuertes posibles. Harley *et al.* (2011), mencionan que todas las dendrocronologías mostraron similitudes en un estudio dendroclimático de *Pinus elliottii*. No obstante, destacan en que la *Ar* resultó comparativamente mejor para explicar la influencia del clima en el crecimiento radial de la especie. Kalela-Brundin, (1999), comparó las tres versiones de cronologías para reconstrucción climática de *Pinus sylvestris* encontrando que las versiones *Ar* y *Sd* son muy afines, resaltando la capacidad de la primera para captar la señal climática. Sin embargo, en experiencias previas, se ha encontrado que la *Ar* tiene cierta auto-correlación “informativa”, sugiriendo compararla con *Rd*. Alternativamente, se recomienda calcular las probabilidades corregidas por la presencia de auto-correlación de acuerdo con el procedimiento usado por Mudelsee (2003).

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indicaron que las series dendrocronológicas de *P. cooperi* registran diferencias en sensibilidad a las variables climáticas, reforzando la hipótesis aquí planteada de que el método de estandarización es particularmente relevante. La debida selección de la ver-



sión dendrocronológica a elegir en los análisis climáticos puede resultar importante; particularmente en la interpretación de la sensibilidad de las especies forestales ante elementos climáticos. El conocimiento de las implicaciones de usar los diferentes índices dendrocronológicos da mayor información de soporte para diseñar estrategias de manejo mejor fundamentadas. Las correlaciones de las tres series fueron coincidentes en meses del año previo al crecimiento. No obstante, la *Rd* mostró mejor capacidad para responder a signos climáticos del año actual. Las series dendrocronológicas no se consideran substitutas entre sí. Cada una de ellas provee diferentes tipos de información y requiere análisis detallados.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se realizó dentro del marco de movilidad académica apoyado por el Conacyt: “Estancias Posdoctorales y Sabáticas al Extranjero para la Consolidación de Grupos de Investigación”. Se reconoce el apoyo de la Escuela Forestal del Norte de Arizona, y del Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP CENID-RASPA. De manera particular se agradece a Julián Cerano Paredes y Omar Duran Guerra por su colaboración en colección y procesamiento de datos de campo y a J. J. Camarero por sus valiosos comentarios referentes al análisis de probabilidades de la auto-correlación temporal.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, H.D. y T.E. Kolb. 2005. Tree growth response to drought and temperature in a mountain landscape in northern Arizona, USA. *Journal of Biogeography* 32:1629–1640.
- Beniston, M. 2002. Climate modeling at various spatial and temporal scales: where can dendrochronology help? *Dendrochronologia* 20:117–131.
- Bickford I N., Z.P. Fulé y T.E. Kolb. 2011. Growth sensitivity to drought of co-occurring *Pinus* spp. along an elevation gradient in northern Mexico. *Western North American Naturalist* 71(3):338–348.
- Biondi, F. y J. Waikul. 2004. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30(3):303–311.
- Brienen, R.J.W., E. Lebrija-Trejos, P.A. Zuidema, y M. Martínez-Ramos. 2010. Climate-growth analysis for a Mexican dry forest tree shows strong impact of sea surface temperatures and predicts future growth declines. *Global Change Biology* 16(7):2001–2012.
- Candel-Pérez, D., J.C. Linares, B. Viñegla y M.E. Lucas-Borja. 2012. Assessing climate-growth relationships under contrasting stands of co-occurring Iberian pines along an altitudinal gradient. *Forest Ecology and Management* 274:48–57.
- Cerano-Paredes, J., J. Villanueva-Díaz, R. D. Valdez-Cepeda, J. G. Arreola-Ávila, y V. Constante-García, V. 2011. El Niño oscilación sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta del Río Nazas. *Revista Chapingo Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente* 17:207–215.
- Cerano-Paredes, J., M. Rivera-González, J. Estrada-Avalos, R. Trucíos-Caciano y J.C Ríos-Saucedo. 2012. Análisis dendrocronológico de *Pinus cooperi* EN Durango, México. *Recursos Forestales Agrofaz* 12(3):81–88.
- Chen, P., C. Welsh y A. Hamann. 2010. Geographic variation in growth response of Douglas-fir to inter-annual climate variability and projected climate change. *Global Change Biology* 16(12):3374–3385.
- Cleaveland, M.K., D.W. Stahle, M.D. Therrell, J. Villanueva-Díaz y B.T. Buns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59:369–388.
- Cook, E.R. y R.L. Holmes. 1986. Users’ manual for program ARSTAN. In: R.L. Holmes, R.K. Adams, y H.C. Fritts, eds. *Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin*. University of Arizona. Tucson, Ariz. p:50–56.
- Cook, E.R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47:37–59.
- CCA-UNAM (Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México). 2013. Atlas Climático Digital de México. Parámetros Bioclimáticos 1902–2011. Disponible en <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml>. Consultado el 11 de marzo de 2014.

- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2012. Datos climáticos de estaciones meteorológicas de Durango: Otinapa.
- Cruz, C.F., H.M. de los Santos P. y J.R. Valdez L. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42(4):473-485.
- Díaz S., C., M.T. Therrell, D.W. Stahle y M.K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter - spring precipitation reconstructed from tree - rings. *Climate Research* 22:237-244.
- Fritts, H.C. 2001 *Tree Rings and Climate*. Blackburn Press. Caldwell, Nueva Jersey. 567 p.
- García-Arévalo, A. y M.S. González-Elizondo. 2003. Pináceas de Durango. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional Forestal, 2ª ed. Xalapa, Ver. y Zapopan, Jal. 187 p.
- González-Elizondo, M.S., M. González-Elizondo y M.A. Márquez-Linares. 2007. Vegetación y ecorregiones de Durango. Plaza y Valdés, S.A. de C.V. México, D.F. 221 p.
- González-Elizondo M., E. Jurado, J. Navar, M.S. Gonzalez-Elizondo, J. Villanueva, O. Aguirre, J. Jiménez. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681–2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management* 213(1-3):39-53.
- González-Elizondo, M.S., M. González-Elizondo, L. Ruacho-González, I.L. López-Enríquez, F.I. Retana-Rentería y J.A. Tena-Flores. 2013. Ecosystems and Diversity of the Sierra Madre Occidental. In: G.J. Gottfried, P.F. Ffolliott, B.S. Gebow, L.G. Eskew y L.C. Collins, comps. 2013. Merging science and management in a rapidly changing world: Biodiversity and management of the Madrean Archipelago III; 2012 May 1-5; Tucson, AZ. Proceedings. RMRS-P-67. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- González M., E. y T.T. Veblen. 2006. Climatic influences on fire in *Araucaria araucana*–*Nothofagus* forests in the Andean cordillera of south-central Chile. *Ecoscience* 13(3): 342–350.
- Grissino-Mayer, H.D., R.L. Holmes y H.C. Fritts. 1996: The international tree-ring data bank. Program library version 2.0 user's manual. Tucson, USA, 106pp.
- Harley G., L., H.D. Grissino-Mayer y S.P. Horn. 2011. The dendrochronology of *Pinus elliottii* var. densa in the Lower Florida Keys: Chronology development and climate response. *Tree-Ring Research* 67(1):39-50.
- Hart, J.L., S.L. van de Gevel, J. Sakulich y H.D. Grissino-Mayer. 2010. Influence of climate and disturbance on the growth of *Tsuga canadensis* at its southern limit in eastern North America. *Trees* 24:621–633
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Huang, J., J.C. Tardif, Y. Bergeron, B. Denneler, F. Berninger y M. P. Girardin. 2010. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology* 16(2):711-731.
- Irby, C.M., P.Z. Fulé, L.L. Yocom y J. Villanueva Díaz. 2013. Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques* 19(1):93-105.
- Jönsson, K. y C. Nilsson. 2009. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on shingle fields: a dendrochronologic reconstruction of early summer precipitation in Mideast Sweden. *Journal of Climate* 22(17):4710-4722.
- Kalela-Brundin, M. 1999. Climatic information from tree-rings of *Pinus sylvestris* L., and a reconstruction of summer temperatures back to AD 1500 in Femundsmarka, eastern Norway, using partial least squares regression (PLS) analysis. *The Holocene* 9(1):59-77.
- Lebourgeois, F., P. Mérian, F., Courdier, J., Ladier, y P. Dreyfus. 2012. Instability of climate signal in tree-ring width in Mediterranean mountains: a multi-species analysis. *Trees* 26(3):715–729.
- Litton, C.M., J.W. Raich y M.G. Ryan. 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13(10):2089-2109.
- Lo, Y.H., J.A. Blanco, B. Seely, C., Welham y J.P., Kimmins. 2010. Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management* 259(5):932-942.



- Méndez M. y V. Magaña. 2010: Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate* 23(5):1175-1188.
- Mérian, P., J.C. Pierrat y F. Lebourgeois. 2013. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* 31(1):58-67.
- Misson L., C. Rathgeber y J Guiot. 2004. Dendroecological analysis of climatic effects on *Quercus petraea* and *Pinus halepensis* radial growth using the process-based MAIDEN model. *Canadian Journal of Forest Research* 34(4):888-898.
- Mudelsee, M. (2003). Estimating Pearson's correlation coefficient with bootstrap confidence interval from serially dependent time series. *Mathematical Geology* 35(6):651-665.
- Pompa G., M. 2012. Geographic information systems for Durango's ecosystems. Disponible en <http://www.ujed.mx/sigeed/Inicio.aspx>. Recuperado el 8 de marzo de 2012.
- Rozas V. e I. García-Gonzalez. 2012. Non-stationary influence of El Niño-Southern Oscillation and winter temperature on oak latewood growth in NW Iberian Peninsula. *International Journal of Biometeorology* 56(5):787-800.
- Santillán-Hernández, M., E. Cornejo-Oviedo, J. Villanueva-Díaz, J. Cerano-Paredes, S. Valencia-Manzo y A. Capó-Arteaga. 2010. Potencial dendrocronológico de *Pinus piniceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques* 16(1): 17-30.
- Seager, R., M. Ting, I. Held, Y. Kushnir, J. Lu, G. Vecchi, H.P. Huang, N. Harnik, A. Leetmaa, N.C. Lau, C. Li, J. Velez y N. Naik. 2007: Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. *Science* 316(5828):1181-1184.
- Seager, R.M., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Naik, J. Nakamura, C. Li, E. Cook, y D.W. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22(1):1-31.
- Stahle D.W., D.J. Burnette, J. Villanueva-Díaz, R.R. Heim Jr, F.K. Fye F., J. Cerano-Paredes, R. Acuna-Soto y M.K. Cleaveland. 2012. Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics* 39(6):1431-1446
- Stokes, M.A. y T.L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press. Chicago. EUA. 73 p.
- Therrell, M.D., D.W. Stahle, M.K. Cleaveland y J. Villanueva-Díaz. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research* 107(D14):6-1 – 6-8
- Troup, A.J. 1965. The 'Southern Oscillation'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 91(390):490-506.
- Viveros-Viveros, H., C. Saenz-Romero, J. Vargas-Hernandez, J. Lopez-Upton, G. Ramirez-Valverde y A. Santacruz-Varela. 2009. Altitudinal variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: height growth, shoot phenology and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257(3):836-842.
- Williams, A.P., C.D. Allen, A.K. Macalady, D. Griffin, C.A. Woodhouse, D.M. Meko, T.W. Swetnam, S.A. Rauscher, R. Seager, H.D. Grissino-Mayer, J.S. Dean, E.R. Cook, C. Gangogadagamage, M. Cai y N.G. McDowell. 2012. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change* 3:292-297, *en prensa*. Doi: 10.1038/NCLIMATE1693.
- Wolter, K. y M.S. Timlin. 2011. El Niño/Southern Oscillation behavior since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext). *International Journal of Climatology* 31(7):1074-1087.

Manuscrito recibido el 8 de marzo de 2013.
Aceptado el 29 de agosto de 2014.

Este documento se debe citar como:
Pompa-García, M., R. Dávalos-Sotelo, E. Rodríguez-Téllez, O.A. Aguirre-Calderón y E.J. Treviño-Garza. 2014. Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana. *Madera y Bosques* 20(3):139-151.