

Analysis of basal area increment of *Pinus hartwegii* Lindl. at different elevations and aspects on Jocotitlán Mountain, State of Mexico

Análisis del incremento en área basal de *Pinus hartwegii* Lindl. a diferente altitud y exposición en el cerro de Jocotitlán, Estado de México

Angélica Núñez-García¹; Armando Gómez-Guerrero^{1*}; Teresa M. Terrazas-Salgado²; J. Jesús Vargas-Hernández¹; José Villanueva-Díaz³

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado Forestal. Carretera México- Texcoco km 36.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

²Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Biología, Departamento de Botánica A105. Tercer Circuito Exterior, Ciudad Universitaria. C. P. 04510. Coyoacán, Ciudad de México, México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA). Margen Derecha del Canal Sacramento km 6.5. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

*Corresponding author: agomezg@colpos.mx; tel.: +52 (595) 952 0200 ext. 1475.

Abstract

Introduction: Basal area increment (BAI) is an indicator of forest productivity that varies with tree age and site factors such as soil and climate.

Objective: To generate tree-ring width index (RWI) and BAI chronologies of *Pinus hartwegii* Lindl., relate them to climatic variables, and study the variation in BAI at different elevations and aspects.

Materials and methods: Four observation sites were identified, combining northwest (NW) and southwest (SW) aspects, as well as elevations of 3 800 and 3 700 m. At each site, the temperature was recorded every four hours for 435 days and 32 growth ring segments were collected using a Pressler's increment borer. Tree-ring width was measured and BAI was calculated; the correlation index between these indicators and the climatic variables was Pearson's correlation coefficient.

Results and discussion: The RWI series from the four observation sites had an intercorrelation of 0.33 ($P < 0.01$). Two low-growth periods were detected, one between 1950 and 1960 and the other between 1990 and 2005. Site SO-3700 had a different growth pattern, due to a second growth phase beginning in 1978, possibly a benefit resulting from increased temperature. The previous autumn temperature, spring temperature and April-September precipitation of the current year explained the variation in BAI ($P < 0.05$).

Conclusion: The BAI of *P. hartwegii* could respond favorably to the predicted increases in temperature at an altitude of 3 700 m with southwest aspect.

Resumen

Introducción: El incremento en área basal (IAB) es un indicador de productividad forestal que varía con la edad del árbol y factores del sitio como suelo y clima.

Objetivo: Generar cronologías de anchura de anillo (IAA) e IAB de *Pinus hartwegii* Lindl., relacionarlas con variables climáticas, y estudiar la variación del IAB a diferentes altitudes y exposiciones.

Materiales y métodos: Se identificaron cuatro sitios de observación, combinando exposiciones noroeste (NO) y suroeste (SO), así como altitudes de 3 800 y 3 700 m. En cada sitio se registró la temperatura cada cuatro horas durante 435 días y se colectaron 32 segmentos de anillos de crecimiento con taladro Preelesler. Se midió la anchura de anillo y se calculó el IAB; el indicador del grado de correlación entre estos indicadores y las variables climáticas fue el coeficiente de correlación de Pearson.

Resultados y discusión: Las series de IAA de los cuatro sitios de observación tuvieron una intercorrelación de 0.33 ($P < 0.01$). Se detectaron dos periodos de bajo crecimiento, uno entre 1950 y 1960 y el otro entre 1990 y 2005. El sitio SO-3700 tuvo un patrón de crecimiento diferente, debido a una segunda fase de crecimiento a partir de 1978, posiblemente, un beneficio por aumento de temperatura. La temperatura del otoño anterior, temperatura de la primavera y precipitación abril-septiembre del año actual explicaron la variación en IAB ($P < 0.05$).

Conclusión: El IAB de *P. hartwegii* podría responder favorablemente a los incrementos pronosticados de temperatura en altitudes de 3 700 m con exposición suroeste.

Keywords: Alpine forest; tree growth; dendrochronology; climate change; seasonal temperature.

Palabras clave: Bosque alpino; crecimiento arbóreo; dendrocronología; cambio climático; temperatura estacional.

Introduction

Basal area increment (BAI) is an indicator of the productivity of forest species. Some of the factors that influence BAI are stand density, tree age, site quality, altitude and aspect. Information on the BAI in relation to altitude and exposure in high mountain forests is useful to understand the variation in tree growth in forest lands (Correa-Díaz et al., 2019; Körner, 2007).

Variation in radial growth and basal area is recorded in the width of the rings, so that, in climate-sensitive species, patterns can be found that are explained by changes in temperature and precipitation (Castruita-Esparza et al., 2016; Deslauriers, Rossi, Anfondillo, & Saracino, 2008). When a common growth response is identified in a series of annual growth rings, it is possible to compare sites with different environmental conditions to understand the variation in tree growth in the landscape (Pompa-García, Cerano-Paredes & Fulé, 2013; Villanueva-Díaz et al., 2007; Villanueva-Díaz, Fulé, Cerano-Paredes, Estrada, & Sánchez, 2009; Villanueva-Díaz et al., 2015c). The evolution of growth, based on ring series, allows establishing possible evidence of the influence of climate change in recent decades.

The radial growth of a ring series can be expressed with standardized measurements known as ring width indices (RWI). Quantitatively, the RWI is the ratio of observed radial growth to that estimated by a growth model that fits the trend data (Cook, 1987), making it a dimensionless index with a mean of one and homogeneous variance. The purpose of the RWI is to remove some of the non-climate related variation and make it possible to compare trees of different ages. RWIs are also used to statistically corroborate tree growth patterns with climate variation patterns. The RWI and BAI can be significantly correlated, so it is possible to consider both indices as a measure of tree growth, although the BAI is used for tree stand characterization purposes. Information from these indices is complementary to the study of a forest's growth responses. The BAI has the advantage of being a two-dimensional variable ($\text{mm}^2\cdot\text{yr}^{-1}$) that allows direct interpretation of tree growth (Castruita-Esparza et al., 2016; Poage & Tappeiner, 2002).

Pinus hartwegii Lindl. produces annual growth rings (Astudillo-Sánchez, Villanueva-Díaz, Endara-Agramont, Nava-Bernal, & Gómez-Albores, 2017; Villanueva-Díaz et al., 2015b); however, drastic seasonal changes in climate in the same year can lead to the formation of false or absent rings (Franco-Ramos, Vázquez-Selem, Stoffel, & Villanueva-Díaz, 2018). Nevertheless, when the global analysis of a ring sample complies with dendrochronological indicators of dating quality, it is possible to identify a common growth response and

Introducción

El incremento en área basal (IAB) es un indicador de la productividad de las especies forestales. Algunos de los factores que influyen en el IAB son la densidad del rodal, edad del arbolado, calidad del sitio, altitud y exposición. La información sobre el IAB con relación a la altitud y exposición en bosques de alta montaña es útil para comprender la variación del crecimiento arbóreo en terrenos forestales (Correa-Díaz et al., 2019; Körner, 2007).

La variación del crecimiento radial y área basal se registra en la anchura de los anillos, por lo que en especies sensibles al clima se pueden encontrar patrones explicados por los cambios en temperatura y precipitación (Castruita-Esparza et al., 2016; Deslauriers, Rossi, Anfondillo, & Saracino, 2008). Cuando en una serie de anillos de crecimiento anual se identifica una respuesta común de crecimiento, es posible comparar sitios de distintas condiciones ambientales para entender la variación del crecimiento arbóreo en el paisaje (Pompa-García, Cerano-Paredes & Fulé, 2013; Villanueva-Díaz et al., 2007; Villanueva-Díaz, Fulé, Cerano-Paredes, Estrada, & Sánchez, 2009; Villanueva-Díaz et al., 2015c). La evolución del crecimiento, a partir de series de anillos, permite establecer posibles evidencias de la influencia del cambio climático en las últimas décadas.

El crecimiento radial de una serie de anillos se puede expresar con mediciones estandarizadas que se conocen como índices de anchura de anillo (IAA). Cuantitativamente, el IAA es el cociente del crecimiento radial observado y el estimado por un modelo de crecimiento que se ajusta a la tendencia de los datos (Cook, 1987), por lo que es un índice adimensional con media uno y varianza homogénea. El propósito del IAA es remover parte de la variación no relacionada con el clima y hacer posible la comparación entre arbolado de edades diferentes. Los IAA también se emplean para corroborar estadísticamente los patrones de crecimiento arbóreo con patrones de variación climática. El IAA y IAB pueden presentar correlación significativa, por lo que es posible considerar ambos índices como una medición del crecimiento arbóreo, aunque el IAB se utiliza para fines de caracterización de masas arboladas. La información de estos índices es complementaria para estudiar las respuestas en crecimiento de un bosque. El IAB tiene la ventaja de ser una variable bidimensional ($\text{mm}^2\cdot\text{año}^{-1}$) que permite la interpretación directa del crecimiento en los árboles (Castruita-Esparza et al., 2016; Poage & Tappeiner, 2002).

Pinus hartwegii Lindl. produce anillos de crecimiento anuales (Astudillo-Sánchez, Villanueva-Díaz, Endara-

use the information for the construction of regional dendrochronological series, climate reconstruction and identification of extreme events (Astudillo-Sánchez et al., 2017; Correa-Díaz et al., 2019; Correa-Díaz et al., 2020). A relevant work with this species is the dendrochronological network developed in northeastern and central Mexico, which demonstrated significant correlation between radial growth and global climatic phenomena such as ENSO (El Niño) (Villanueva-Díaz et al., 2015b).

This work aimed to generate RWI and BAI chronologies of *P. hartwegii*, relate them to climatic variables of weather stations near the study area, and analyze the variation in BAI in trees of different elevations and aspect. The general hypothesis of the study was that the growth of *P. hartwegii* varies with altitude and aspect, maintaining a statistically significant correlation with climatic variables.

Materials and methods

Study area

Jocotitlán Mountain is located in the municipality of the same name in the State of Mexico, with coordinates 19° 36' 45" NL and 99° 39' 33" WL. The predominant climate is subhumid temperate (Cw) with rains in summer and an average annual temperature of 13.2 °C. Average annual rainfall is 1 008 mm with frosts in November and January. Occasionally, there are snowfalls in the highlands (Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [INAFED], 2020).

Selection of study sites

P. hartwegii grows in high mountain forests in Mexico and Central America, at elevations of 3 000 to 4 000 m (Musálem & Solís, 2000; Viveros-Viveros et al., 2009). The presence of this species at 4 000 m is associated with the altitudinal limit for the establishment of tree species and defines the region where forest environmental services begin, such as soil formation, scenic view, water capture and soil carbon retention (Gómez-Guerrero & Doane, 2018).

To capture the variation in growth based on the site's topographic position, two altitudinal levels (3 700 and 3 800 m) and two aspects distributed in two quadrants (northwest [NW] and southwest [SW]) were considered. Table 1 shows the location of the four study sites. An electronic logger (Data Logger, HOBO U23 Pro v2, USA) was installed at each observation site to measure temperature and relative humidity, every four hours for 435 days, starting April 21, 2017.

Agramont, Nava-Bernal, & Gómez-Albores, 2017; Villanueva-Díaz et al., 2015b); sin embargo, los cambios drásticos estacionales de clima en el mismo año pueden dar lugar a la formación de anillos falsos o ausentes (Franco-Ramos, Vázquez-Selem, Stoffel, & Villanueva-Díaz, 2018). A pesar de ello, cuando el análisis conjunto de una muestra de anillos cumple con indicadores dendrocronológicos de calidad de fechado, es posible identificar una respuesta común en crecimiento y utilizar la información para la construcción de series dendrocronológicas regionales, la reconstrucción del clima e identificación de eventos extremos (Astudillo-Sánchez et al., 2017; Correa-Díaz et al., 2019; Correa-Díaz et al., 2020). Un trabajo relevante con esta especie es la red dendrocronológica desarrollada en el noreste y centro de México, la cual demostró correlación significativa entre el crecimiento radial y fenómenos climáticos globales como ENSO (El Niño) (Villanueva-Díaz et al., 2015b).

Este trabajo tuvo como objetivo generar cronologías de IAA y IAB de *P. hartwegii*, relacionarlas con variables climáticas de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, y analizar la variación del IAB en árboles de altitudes y exposiciones diferentes. La hipótesis general del estudio fue que el crecimiento de *P. hartwegii* varía con la altitud y exposición, manteniendo una correlación estadísticamente significativa con las variables climáticas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El cerro de Jocotitlán se ubica en el municipio con el mismo nombre en el Estado de México, con coordenadas 19° 36' 45" LN y 99° 39' 33" LO. El clima predominante es templado subhúmedo (Cw) con lluvias en verano y temperatura media anual de 13.2 °C. La precipitación media anual es de 1 008 mm con heladas en noviembre y enero. Ocasionalmente, hay nevadas en las regiones altas (Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [INAFED], 2020).

Selección de sitios de estudio

P. hartwegii crece en bosques de alta montaña en México y Centroamérica, en altitudes de 3 000 a 4 000 m (Musálem & Solís, 2000; Viveros-Viveros et al., 2009). La presencia de esta especie a los 4 000 m se asocia con el límite altitudinal de establecimiento de especies arbóreas y define la región donde inician servicios ambientales del bosque, como la formación de suelo, vista escénica, captación de agua y retención de carbono edáfico (Gómez-Guerrero & Doane, 2018).

Table 1. Location of the study sites on Jocotitlán Mountain, State of Mexico.
Cuadro 1. Ubicación de los sitios de estudio en el cerro de Jocotitlán, Estado de México.

Site code/ Clave de sitio	Altitude ^a (m)/ Altitud ^a (m)	North latitude/ Latitud norte	West longitude/ Longitud oeste
NW-3800/NO-3800	3 800	19° 44' 32''	99° 45' 52''
SW-3800/SO-3800	3 800	19° 44' 29''	99° 45' 58''
NW-3700/NO-3700	3 700	19° 44' 36''	99° 45' 39''
SW-3700/SO-3700	3 700	19° 44' 23''	99° 46' 05''

^aThe exact altitudinal position has a variation of ± 15 m.

^aLa posición altitudinal exacta tiene una variación de ± 15 m.

Collection of growth cores

At each site, 16 healthy, dominant or co-dominant *P. hartwegii* trees with a straight stem were selected. In order for the basal area estimates to be representative, four trees were located per quadrant with a trunk cross section that was as cylindrical as possible and free of mechanical damage. The tree density was estimated at four 1 000 m² sites that indicated low density with 180 trees·ha⁻¹ and 14 m²·ha⁻¹ of basal area, on average. Each sample tree was measured for diameter at breast height with a diameter tape and total height with a Haga altimeter, with a precision of 0.5 cm and 0.5 m, respectively.

Two growth cores were extracted from each tree, crosswise to the slope, at a height of 1.3 m above the ground. The two cores were taken in opposite directions, using a 6 mm diameter Pressler drill. A total of 128 growth segments were collected. The use of two or more segments per tree made it possible to detect the presence of false growth rings more easily, since the dating of a tree segment that reaches the pith serves as a guide for the segment on the opposite side (Bernal-Salazar & Terrazas-Salgado, 2000; Correa-Díaz et al., 2014). The wood samples were wrapped with newspaper and labeled.

Dating and measurement

The tree-ring samples were mounted on wooden supports with white glue and, once dry, were polished with sandpaper of different grit sizes in a sequence of 80 to 1 000, until the growth rings were clearly visualized; then they were scanned (EPSON scanner) at a resolution of 600 dpi. On the scanned images, the ring width was measured with the WinDENDRO® software (Regent-Instruments-Canada, 2016). The ring samples were also manually matched using a Nikon stereo viewer (SMZ800), mainly to identify years with atypical radial growth common between samples.

Para captar la variación en crecimiento con base en la posición topográfica del sitio, se consideraron dos niveles altitudinales (3 700 y 3 800 m) y dos exposiciones distribuidas en dos cuadrantes (noroeste [NO] y suroeste [SO]). El Cuadro 1 muestra la ubicación de los cuatro sitios de estudio. En cada sitio de observación se instaló un registrador electrónico (Data Logger, HOBO U23 Pro v2, EUA) para medir la temperatura y humedad relativa, cada cuatro horas durante 435 días, a partir del 21 de abril del 2017.

Colecta de núcleos de crecimiento

En cada sitio se seleccionaron 16 árboles de *P. hartwegii* sanos, dominantes o codominantes y con fuste recto. Para que las estimaciones de área basal fueran representativas, se ubicaron cuatro árboles por cuadrante con sección transversal del tronco lo más cilíndrica posible y que no tuvieran daño mecánico. La densidad arbórea se estimó en cuatro sitios de 1 000 m² que indicaron baja densidad con 180 árboles·ha⁻¹ y 14 m²·ha⁻¹ de área basal, en promedio. A cada árbol muestra se midió el diámetro normal con cinta diamétrica y la altura total con pistola Haga, con precisión de 0.5 cm y 0.5 m, respectivamente.

De cada árbol se extrajeron, de manera transversal a la pendiente, dos núcleos de crecimiento a 1.3 m de altura sobre el suelo. Los dos núcleos se tomaron en sentido opuesto, utilizando un taladro de Pressler de 6 mm de diámetro. En total se colectaron 128 segmentos de crecimiento. El uso de dos o más segmentos por árbol permitió detectar la presencia de anillos de crecimiento falsos con mayor facilidad, ya que el fechado de un segmento de un árbol que llega a la médula sirve como guía para el segmento del lado opuesto (Bernal-Salazar & Terrazas-Salgado, 2000; Correa-Díaz et al., 2014). Las muestras de madera se envolvieron con papel periódico y se etiquetaron.

Ring width index

A total of 6 058 measurements were considered, covering a period from 1900 to 2016 with an average age of 75 years and first-order autocorrelation of 0.67. To standardize the growth series of each tree and eliminate biological (competition, suppression and release) and geometric (due to the increase in diameter with age) trends not related to climate, a smoothed curve (spline) with a frequency of 50 % and wavelength of 2/3 of the series was used. These parameters were established using the *dplr* package (Bunn, 2008; Cook, 1987) in R language (R Development Core Team, 2007). With the ratio of the ring width values and those estimated by the function (spline), a dimensionless ring width index series was generated, with a mean of 1.0 and homogeneous variance, which in this study was 0.016. Finally, to highlight the low frequency periods (extreme events) another smoothed curve was used with a fitting parameter every 10 years (Cook & Peters, 1981).

Basal area increment

The BAI was determined from direct ring width measurements with the following equation:

$$BAI = \pi(R_i^2 - R_{i-1}^2)$$

where, i is the year of growth ring formation and R is the stem radius (cm). In order to evaluate forest productivity by site, BAI series were prepared, averaging measurements of those trees with circular and statistically significant stems in the dating.

Climatic information

Since there is no weather station in the upper part of Jocotitlán Mountain, meteorological data from eight stations located around the mountain were used (Table 2), obtained with the *Extracción Rápida de Información Climatológica* (Rapid Extraction of Climate Information) software version 3.2 (ERIC III, 2014). The variables used were monthly rainfall and average, minimum and maximum temperatures for the month; the available data from the eight nearby stations were averaged. The period of instrumental records that was combined with the available stations covered the period 1961-2010.

Correlation between the ring width index, basal area increment and climatic variables

The climatic response of *P. hartwegii* was evaluated with the *treeclim* package (Zang & Biondi, 2015) written in R language (R Development Core Team, 2007), with which the RWI series was correlated with monthly averages of mean, minimum, maximum

Fechado y medición

Las muestras de anillos se montaron en soportes de madera con pegamento blanco y, una vez secas, se pulieron con lijas de diferente granulometría en una secuencia de 80 a 1 000, hasta visualizar los anillos de crecimiento con claridad; posteriormente, se escanearon (escáner EPSON) a una resolución de 600 dpi. Sobre las imágenes escaneadas se midió la anchura de anillo con el *software* WinDENDRO® (Regent-Instruments-Canada, 2016). Las muestras de anillos también se cotejaron de forma manual con un estereoscopio Nikon (SMZ800), identificando principalmente los años con crecimiento radial atípico comunes entre muestras.

Índice de anchura de anillo

Las mediciones consideradas fueron 6 058, abarcando un periodo de 1900 a 2016 con una edad media de 75 años y autocorrelación de primer orden de 0.67. Para estandarizar las series de crecimiento de cada árbol y eliminar tendencias biológicas (competencia, supresión y liberación) y geométricas (debido al incremento en diámetro con la edad) no relacionadas con el clima, se utilizó una curva suavizada (*spline*) con frecuencia del 50 % y longitud de onda de 2/3 de la serie. Dichos parámetros se establecieron usando la paquetería *dplr* (Bunn, 2008; Cook, 1987) en lenguaje R (R Development Core Team, 2007). Con el cociente de los valores de anchura de anillo y los estimados por la función (*spline*), se generó una serie de índice de anchura de anillo adimensional, con media 1.0 y varianza homogénea, que en este estudio fue 0.016. Finalmente, para resaltar los periodos de baja frecuencia (eventos extremos) se utilizó otra curva suavizada con un parámetro de ajuste cada 10 años (Cook & Peters, 1981).

Incremento en área basal

El IAB se determinó a partir de las mediciones directas de anchura de anillo con la ecuación siguiente:

$$IAB = \pi(R_i^2 - R_{i-1}^2)$$

donde, i es el año de formación del anillo de crecimiento y R es el radio del fuste (cm). Con el fin de evaluar la productividad forestal por sitio, se elaboraron series de IAB, promediando mediciones de aquellos árboles con fustes circulares y estadísticamente significativos en el fechado.

Información climática

Dado que no existen datos climáticos en la parte alta de la montaña Jocotitlán, se recurrió a datos meteorológicos de ocho estaciones ubicadas alrededor de la montaña (Cuadro 2), obtenidos con el *software* de Extracción Rápida de Información

Table 2. Weather stations around Jocotitlán Mountain, State of Mexico, used to obtain meteorological data for the period 1961-2010.

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas alrededor del Cerro de Jocotitlán, Estado de México, utilizadas para la obtención de datos meteorológicos del periodo 1961-2010.

Code/ Clave	Name/ Nombre	Altitude (m)/ Altitud (m)	Latitude/ Latitud	Longitude/ Longitud
15009	Atlacomulco (SMN)	2 560	19° 48' 00"	99° 52' 59"
15072	Presa Embajomuy	2 670	19° 42' 36"	99° 56' 42"
15078	Presa Francisco Trinidad	2 718	19° 49' 30"	99° 47' 28"
15139	Atlacomulco I (DGE)	2 550	19° 47' 46"	99° 53' 28"
15208	Pozo cuatro	2 538	19° 42' 40"	99° 49' 48"
15251	Atlacomulco II (DGE)	2 574	19° 47' 53"	99° 52' 26"
15278	Santiago Acutzilapan	3 061	19° 45' 36"	99° 45' 32"
15390	ETA 013 Jocotitlán	2 650	19° 42' 40"	99° 47' 20"

SMM: National Meteorological System; DGE: General Directorate of Studies of the National Water Commission; ETA: Agricultural Technical School.

SMM: Sistema Meteorológico Nacional; DGE: Dirección General de Estudios de la Comisión Nacional del Agua; ETA: Escuela Técnica Agropecuaria.

temperature and precipitation. Once the statistically significant climatic variables were identified ($P < 0.05$), a correlation analysis between the RWI and the significant climatic variables was also made. The correlation degree indicator was Pearson's correlation coefficient.

The treeclim package tests the correlation between ring indicators and climatic variables by generating confidence intervals ($P < 0.05$) built by resampling with the same ring series (Dixon, 2006); specifically, treeclim performs 1 000 iterations to calculate these intervals (Zang & Biondi, 2015). Correlations were seasonally tested from September of the previous year to December of the current year, given that the main responses of the studied species are found in that period (Correa-Díaz et al., 2020).

The variation in BAI was also analyzed based on cambial age (biological age) to determine the expected trajectory of tree growth at each of the four observation sites. Aligned with cambial age, the BAI data are sorted by giving the zero-time value to the point of the pith of each tree, which allows comparing the evolution of growth between two trees. Technically, the evolution of the BAI with respect to cambial age describes the current annual basal area increment.

Results

Parameters of the sample trees

The youngest and tallest trees were located at site SO-3700. Tree height was lower at the higher elevation, while the diameter did not show a trend in relation to altitude or aspect (Table 3).

Climatológica versión 3.2 (ERIC III, 2014). Las variables utilizadas fueron la precipitación mensual y la temperatura media, mínima y máxima del mes; los datos disponibles de las ocho estaciones cercanas se promediaron. El periodo de registros instrumentales que se combinó con las estaciones disponibles cubrió el periodo 1961-2010.

Correlación entre el índice de anchura de anillo, incremento de área basal y variables climáticas

La respuesta climática de *P. hartwegii* se evaluó con el paquete treeclim (Zang & Biondi, 2015) escrito en lenguaje R (R Development Core Team, 2007), con el cual se correlacionó la serie de IAA con los promedios mensuales de temperatura media, mínima, máxima y precipitación. Una vez identificadas las variables climáticas estadísticamente significativas ($P < 0.05$), se hizo también un análisis de correlación entre el IAB y las variables climáticas significativas. El indicador del grado de correlación fue el coeficiente de correlación de Pearson.

El paquete treeclim prueba la correlación entre indicadores de los anillos y variables climáticas generando intervalos de confianza ($P < 0.05$) construidos mediante remuestreos con las mismas series de anillos (Dixon, 2006); específicamente treeclim realiza 1000 iteraciones para calcular dichos intervalos (Zang & Biondi, 2015). Las correlaciones se probaron estacionalmente desde el mes desde septiembre del año previo a diciembre del año actual, dado que se ha visto que en dicho periodo están las principales respuestas de la especie estudiada (Correa-Díaz et al., 2020).

Table 3. Dasometric characteristics of *Pinus hartwegii* trees sampled on Jocotitlán Mountain, State of Mexico.**Cuadro 3. Características dasométricas de árboles muestreados de *Pinus hartwegii* en el cerro de Jocotitlán, Estado de México.**

Site/ Sitio	Diameter (cm)/ Diámetro (cm)	Height (m)/ Altura (m)	Age (years)/ Edad (años)
NW-3800/NO-3800	32.83 ± 3.35	11.03 ± 1.34	89.28 ± 12.29
SW-3800/SO-3800	34.63 ± 2.10	13.14 ± 2.83	85.58 ± 12.18
NW-3700/NO-3700	35.13 ± 4.84	14.44 ± 2.29	87.33 ± 12.01
SW-3700/SO-3700	33.18 ± 8.43	16.42 ± 4.60	52.38 ± 16.02

Mean of the variable ± standard error.

Media de la variable ± error estándar.

Ring width index series

RWI changes were variable from one tree to another. However, with 80 segments (63 %) a RWI series was obtained with a correlation between segments of 0.33 ($P < 0.01$), slightly higher than the acceptable minimum of 0.32 (Holmes, 1983). According to Figure 1, two low-growth periods were observed: the first between 1950 and 1960, and the second between 1990 and 2005, while the periods of highest growth were from 1965 to 1985 and from 2012 to 2016.

Basal area increment

Figure 2 shows that the BAI series of the four sites showed peak growth in 1970, with a subsequent decrease; however, unlike the rest of the sites, site SO-3700 had a higher BAI from 1978 onwards. Except for site SO-3700, the BAI was relatively stable and equal between sites from 1995 to 2015.

Basal area increment and cambial age

The BAI trend according to cambial age showed that, at all sites, trees had their maximum growth in the juvenile stage between 20 and 50 years; the trees at site SO-3700 outperformed the rest, as can be seen in Figure 3. One trend that stands out is that at approximately 80 years, the trees at all sites converge at a BAI close to 400 mm²-yr⁻¹. The oldest tree, found in the NW aspect, showed a slight increase in BAI after 90 years, regardless of altitude (Figure 3).

Correlation between ring width index and climatic variables

Based on Table 4, the climatic variables statistically related ($P < 0.05$) to the RWI were: maximum temperature of October of the previous year, maximum temperature of September-October of the previous

La variación del IAB también se analizó con base en la edad del cámbium (edad biológica) para conocer la trayectoria esperada de crecimiento arbóreo en cada uno de los cuatro sitios de observación. Alineados con la edad del cámbium, los datos de IAB se ordenan dando el valor de tiempo cero al punto de la médula de cada árbol, lo que permite comparar la evolución de crecimiento entre dos árboles. Técnicamente, la evolución del IAB con respecto a la edad cambial describe el incremento corriente anual del área basal.

Resultados

Parámetros de los árboles muestra

Los árboles más jóvenes y de mayor altura se ubicaron en el sitio SO-3700. Las alturas fueron menores en la elevación mayor, mientras que el diámetro no presentó una tendencia con relación a la altitud o exposición (Cuadro 3).

Serie de índice de anchura de anillo

Los cambios de IAA fueron variables de un árbol a otro. No obstante, con 80 segmentos (63 %) se obtuvo una serie de IAA con una correlación entre segmentos de 0.33 ($P < 0.01$), ligeramente superior a la mínima satisfactoria que es 0.32 (Holmes, 1983). De acuerdo con la Figura 1 se observaron dos periodos de bajo crecimiento: el primero entre 1950 y 1960, y el segundo entre 1990 y 2005; mientras que los periodos de mayor crecimiento fueron de 1965 a 1985 y del 2012 al 2016.

Incremento en área basal

La Figura 2 muestra que las series de IAB de los cuatro sitios mostraron un pico de crecimiento en 1970, con una disminución posterior; sin embargo, a diferencia del resto de los sitios, el sitio SO-3700 tuvo mayor IAB a partir de 1978. Excepto por el sitio SO-3700, el IAB

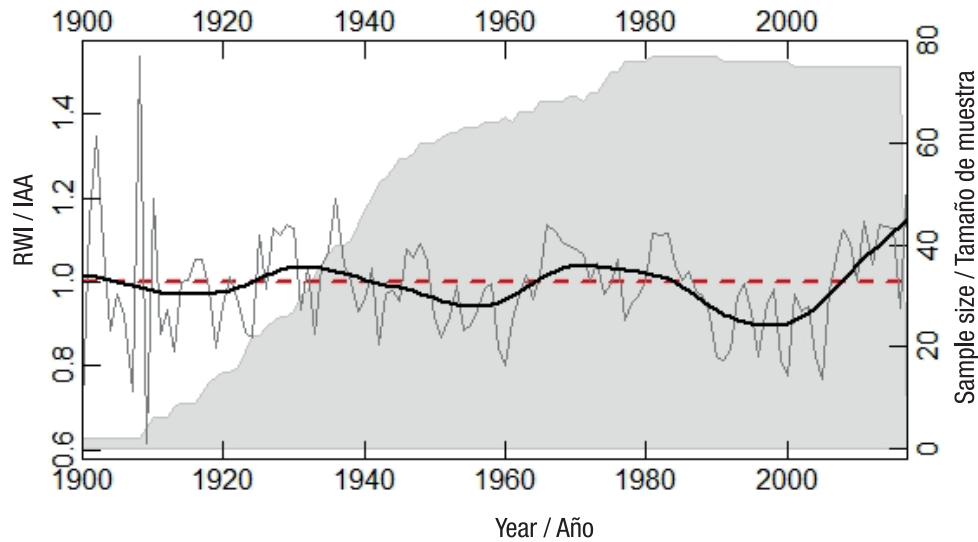


Figure 1. Ring width index (RWI) chronology of *Pinus hartwegii* for the Jocotitlán Mountain region, State of Mexico. The gray line represents the mean RWI values, the dotted line is the RWI mean and the solid black line is the estimated smoothed line.

Figura 1. Cronología de índice de anchura de anillo (IAA) de *Pinus hartwegii* para la región del cerro Jocotitlán, Estado de México. La línea gris representa los valores medios de IAA, la línea punteada es la media de IAA y la línea sólida negra es la línea suavizada estimada.

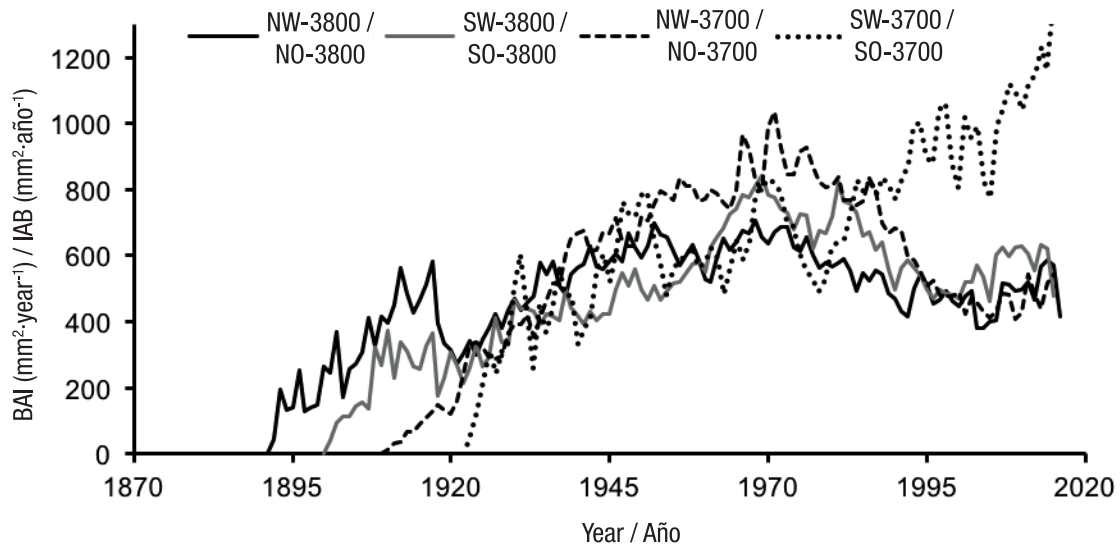


Figure 2. Evolution of the basal area increment (BAI) of *Pinus hartwegii* at the study sites with northwest (NW) and southwest (SW) aspects with elevations of 3 800 and 3 700 m on Jocotitlán Mountain, State of Mexico.

Figura 2. Evolución de incremento en área basal (IAB) de *Pinus hartwegii* en los sitios de estudio con exposición noroeste (NO) y suroeste (SO) con altitud de 3 800 y 3 700 m en el cerro de Jocotitlán, Estado de México.

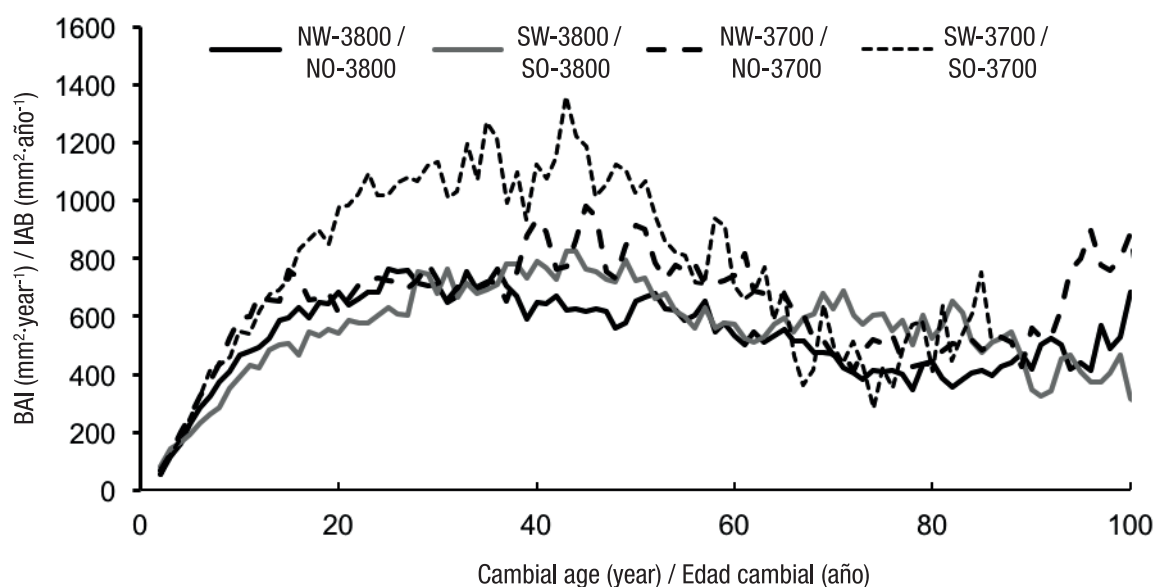


Figure 3. Variation in the basal area increment (BAI) of *Pinus hartwegii*, with respect to cambial age, at the study sites with northwestern (NW) and southwestern (SW) aspect at elevations of 3 800 and 3 700 m on Jocotitlán Mountain, State of Mexico.

Figura 3. Variación del incremento en área basal (IAB) de *Pinus hartwegii*, con respecto a la edad cambial, en los sitios de estudio con exposición noroeste (NO) y suroeste (SO) con altitud de 3 800 y 3 700 m en el cerro de Jocotitlán, Estado de México.

Table 4. Correlation between the ring width index (RWI) of *Pinus hartwegii* and climatic variables at different elevations and aspects on Jocotitlán Mountain, State of Mexico.

Cuadro 4. Correlación entre el índice de anchura de anillo (IAA) de *Pinus hartwegii* y las variables climáticas bajo diferente altitud y exposición en el cerro de Jocotitlán, Estado de México.

Period/ Periodo	Variable	Four sites/ Cuatro sitios	3 700 m	3 800 m	NW/NO	SW/SO
Previous year/ Año previo	October maximum temperature/ Temperatura máxima octubre	0.314*	0.321*	0.301*	0.354*	0.215
	September-October maximum temperature/ Temperatura máxima septiembre-octubre	0.291*	0.266*	0.291*	0.347*	0.203
Current year / Año actual	February mean temperature/ Temperatura media febrero	-0.361*	-0.374*	-0.284	-0.464*	-0.219
	March mean temperature/ Temperatura media marzo	-0.321*	-0.388*	-0.232	-0.436*	-0.123
	February-March mean temperature / Temperatura media febrero-marzo	-0.381*	-0.418*	-0.289	-0.501*	-0.191
	April-September rainfall / Precipitación abril-septiembre	0.398*	0.395*	0.293	0.373*	0.328*

*Statistically significant values according to Pearson's correlation coefficient ($P < 0.05$).

*Valores estadísticamente significativos de acuerdo con el coeficiente de correlación de Pearson ($P < 0.05$).

year, and average temperatures of February, March, and February-March of the current year. The NW sites and those at 3 700 showed the highest statistical correlation between RWI values and climatic variables. It should be noted that the correlations with the previous year's maximum temperature were positive, while with the current year's average temperature they were negative.

Correlation between BAI and climatic variables

According to Table 5, the relationship between BAI and climatic variables was statistically significant ($P < 0.05$) for the current year's temperature and precipitation. The sites at 3 700 m stand out as the most sensitive to climate variability.

Discussion

Ring width index and basal area increment series

The high variation in RWI between trees reflects the same climatic variation in time from one year to another and in space from one site to another. The contrasting climate between sites differentiated the response in tree growth. This is evidenced by the low but significant intercorrelation among segments, which barely exceeded the acceptable limit (0.32). Other authors who have worked with the same species have

se mostró relativamente estable e igual entre sitios de 1995 a 2015.

Incremento de área basal y edad cambial

La tendencia del IAB de acuerdo con la edad cambial mostró que, en todos los sitios, los árboles tuvieron su máximo crecimiento en la etapa juvenil entre 20 y 50 años; los árboles del sitio SO-3700 superaron al resto, tal como se observa en la Figura 3. Una tendencia que destaca es que aproximadamente a los 80 años, los árboles en todos los sitios convergen en un IAB cercano a $400 \text{ mm}^2 \cdot \text{año}^{-1}$. El arbolado de mayor edad, que es el que se encuentra en la exposición NO, presentó ligero aumento en IAB después de los 90 años, independientemente de la altitud (Figura 3).

Correlación entre índice de anchura de anillo y variables climáticas

Con base en el Cuadro 4, las variables climáticas relacionadas estadísticamente ($P < 0.05$) con el IAA fueron: temperatura máxima de octubre del año previo, temperatura máxima de septiembre-octubre del año previo y temperaturas medias de febrero, marzo, y febrero-marzo del año actual. Los sitios al NO y los sitios a 3 700 m mostraron mayor correlación estadística entre valores de IAA y las variables climáticas. Cabe

Table 5. Correlation between the ring width index (RWI) of *Pinus hartwegii* and climatic variables at different elevations and aspects on Jocotitlán Mountain, State of Mexico.

Cuadro 5. Correlación entre el incremento en área basal (IAB) de *Pinus hartwegii* y variables climáticas bajo diferente altitud y exposición en el cerro de Jocotitlán, Estado de México.

Period/ Periodo	Variable	Four sites/ Cuatro sitios	3 700 m	3 800 m	NW/NO	SW/SO
Previous year/ Año previo	October maximum temperature/ Temperatura máxima octubre	0.314*	0.277	0.265	0.237	0.160
	September-October maximum temperature/ Temperatura máxima septiembre-octubre	0.266	0.128	0.299	0.234	0.073
Current year / Año actual	February mean temperature/ Temperatura media febrero	-0.493 *	-0.447*	-0.404*	-0.436*	-0.131
	March mean temperature/ Temperatura media marzo	-0.307*	-0.430*	-0.145	-0.143	-0.307
	February-March mean temperature / Temperatura media febrero-marzo	-0.446*	-0.489*	-0.307*	-0.324*	-0.243
	April-September rainfall / Precipitación abril-septiembre	0.520*	0.407*	0.473*	0.449*	0.159

*Statistically significant values according to Pearson's correlation coefficient ($P < 0.05$).

*Valores estadísticamente significativos de acuerdo con el coeficiente de correlación de Pearson ($P < 0.05$).

obtained higher intercorrelations of 0.55 (Villanueva et al., 2018). Another reason that explains the low correlation is that in this study trees were selected to represent the stand's BAI and not necessarily the trees most subject to water and nutritional stress, such as those preferably selected for climate reconstruction purposes (Schweingruber, Kairiukstis, & Shiyatov, 1990; Villanueva-Díaz et al., 2015a).

The microclimatic conditions between sites were different, particularly at maximum temperatures. At site SO-3800, the highest temperatures occurred in autumn and winter (Figure 4). Although the fastest growing site, SO-3700, did not have the highest temperatures in 2017-2018, it was the site with the least thermal oscillation and the fewest low-temperature events close to 0 °C (Figure 4), which should have favored the BAI. Temperature is a factor that determines cambial activity and, therefore, xylogenesis (Begum et al., 2018).

destacar que las correlaciones con temperatura máxima del año previo fueron positivas, mientras que con la temperatura media del año actual fueron negativas.

Correlación entre IAB y variables climáticas

Acorde con el Cuadro 5, la relación entre IAB y las variables climáticas fue estadísticamente significativa ($P < 0.05$) para la temperatura y precipitación del año actual. Los sitios a 3 700 m destacan como los más sensibles a la variabilidad climática.

Discusión

Serie de índice de anchura de anillo e incremento de área basal

La alta variación de IAA entre árboles refleja la misma variación climática en el tiempo de un año a otro y en el espacio de un sitio a otro. El clima contrastante

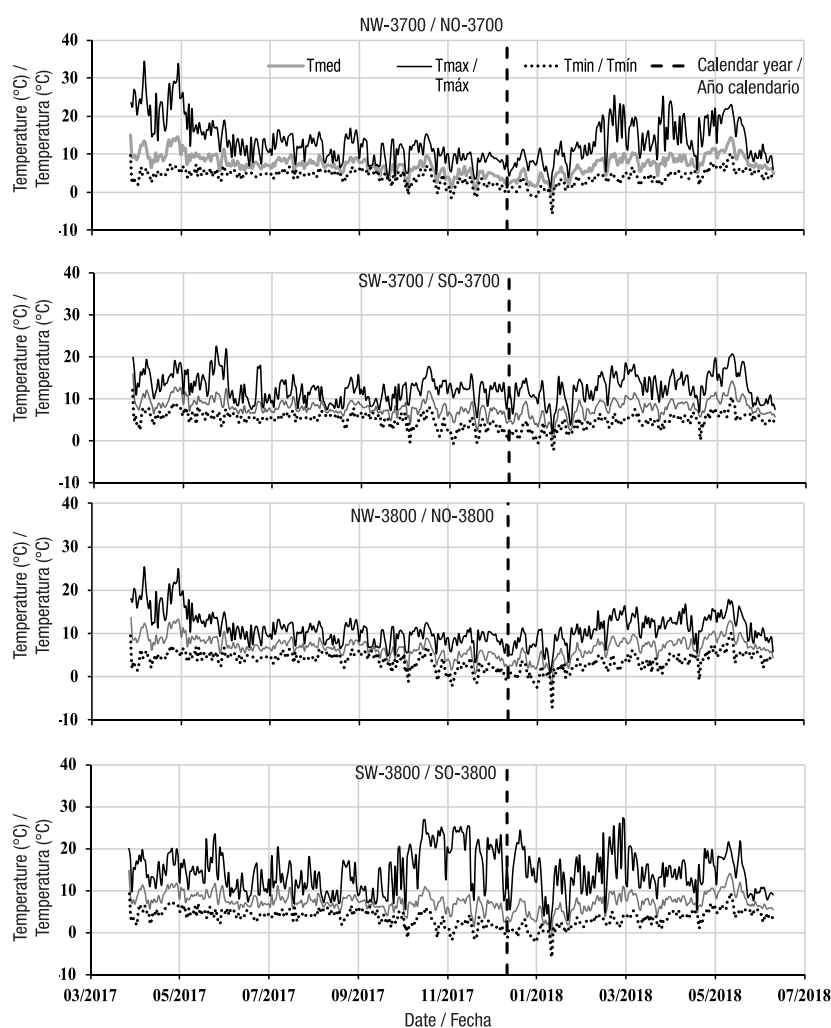


Figure 4. Temperature variation at *Pinus hartwegii* sampling sites in the study sites with northwest (NW) and southwest (SW) aspects at elevations of 3 800 and 3 700 m on Jocotitlán Mountain, State of Mexico.

Figura 4. Variación de la temperatura en los sitios de muestreo de *Pinus hartwegii* en los sitios de estudio con exposición noroeste (NO) y suroeste (SO) con altitud de 3 800 y 3 700 m en el cerro de Jocotitlán, Estado de México.

In *Pinus leucodermis* Ant., the 0.5 °C increase in mean air temperature, coupled with the extension of the growing season, resulted in earlier cambial activation, which translated into wider rings (Deslauriers et al., 2008). In particular, Jocotitlán Mountain, being an isolated volcano on a plain, is subject to cold air masses and moisture in different directions that result in contrasting environmental conditions.

Site SO-3700 was the only one that showed a second phase of increase in BAI after 1978 (Figure 2). This result can be explained by the information from the data loggers in the period 2017-2018, since, at that site, there were only 10 days of extreme temperatures below zero, while, at elevations of 3 800 m, such temperatures occurred on 24 of the 435 days observed. Additionally, the site's condition with deeper soil and greater water storage capacity at lower elevations must have played a role. The results of this study indicate that the maximum temperatures in autumn (September and October) are important for the radial growth of *P. hartwegii* (Figure 4), possibly because the stage of cambial activity is prolonged (Begum et al., 2018). Dufour and Morin (2013) have also reported that temperature is a critical factor, both at the beginning and end of *Picea mariana* (Mills.) xylogenesis. For species such as *Abies alba* Mills. and *Picea abies* Karst., water availability and autumn-winter temperatures of the previous year are important (Lebourgeois, 2007), a relationship probably similar to that observed in this study.

Precipitation in April and August of the current year in lower altitude species such as *Pinus pseudostrobus* Lindl. and *P. devoniana* Lindl. defines the ring width, but the increase in maximum temperature in summer has a negative effect on both species (Marlés et al., 2015); that is, at low elevations, the effect of the temperature increase can be negative, and positive in high mountain forests, such as the study area one.

Cambial age

The BAI trend with respect to cambial age indicates that, regardless of site conditions, the trees showed a common biological pattern, in which the juvenile period between 20 and 50 years is the one with the highest productivity or highest current increment. The low density of the trees (180 trees·ha⁻¹), corroborated in sites of 1 000 m², suggests that the observed trends are not affected by the proximity between trees, since it implies an average distance between trees of 7.5 m.

Relationship of ring width index and basal area increment with climatic variables

Compared to the BAI, the RWI was more sensitive to temperature, including the months of October and

entre sitios diferenció la respuesta en el crecimiento de los árboles. Esto se evidencia en la baja pero significativa intercorrelación entre segmentos, la cual apenas superó el límite aceptable (0.32). Otros autores que han trabajado con la misma especie han obtenido intercorrelaciones superiores de 0.55 (Villanueva et al., 2018). Otra razón que explica la baja correlación es que en este estudio se seleccionaron árboles para representar el IAB del rodal y no necesariamente los árboles más sujetos a estrés hídrico y nutrimental como los que preferentemente se seleccionan para fines de reconstrucción climática (Schweingruber, Kairiukstis, & Shiyatov, 1990; Villanueva-Díaz et al., 2015a).

Las condiciones microclimáticas entre sitios fueron diferentes, particularmente en las temperaturas máximas. En el sitio SO-3800, las temperaturas más altas se presentaron en otoño e invierno (Figura 4). A pesar de que el sitio SO-3700, de mayor crecimiento, no presentó las temperaturas más altas en 2017-2018, fue el sitio con menor oscilación térmica y menores eventos cercanos a 0 °C (Figura 4), lo que debió haber favorecido el IAB. La temperatura es un factor que determina la actividad del cámbium y, por lo tanto, la xilogénesis (Begum et al., 2018). En *Pinus leucodermis* Ant., el aumento de 0.5 °C en la temperatura media del aire, aunado a la ampliación de la estación de crecimiento, resultó en la activación más temprana del cámbium, lo que se tradujo en anillos más anchos (Deslauriers et al., 2008). Particularmente, el cerro de Jocotitlán, por ser un volcán aislado sobre una planicie está sujeto a masas de aire frío y humedad en diferentes direcciones que dan lugar a condiciones ambientales contrastantes.

El sitio SO-3700 fue el único que mostró una segunda fase de aumento en IAB después de 1978 (Figura 2). Este resultado se puede explicar por la información de los registradores electrónicos en el periodo 2017-2018, ya que, en dicho sitio, solo ocurrieron 10 días de temperaturas extremas bajo cero, mientras que, en altitudes de 3 800 m fueron 24 de los 435 días observados. Adicionalmente, debió influir la condición del sitio con un suelo más profundo y mayor capacidad de almacenamiento de agua en altitudes más bajas. Los resultados de este estudio indican que las temperaturas máximas en otoño (septiembre y octubre) son importantes para el crecimiento radial de *P. hartwegii* (Figura 4), posiblemente porque la etapa de la actividad cambial se prolonga (Begum et al., 2018). Dufour y Morin (2013) también han reportado que la temperatura es un factor crítico, tanto al comienzo como al final de la xilogénesis de *Picea mariana* (Mills.). Para especies como *Abies alba* Mills. y *Picea abies* Karst., la disponibilidad de agua y las temperaturas de otoño-invierno del año previo son importantes (Lebourgeois, 2007); una relación probablemente similar a la observada en este estudio.

September of the previous year. These months, which correspond to the previous autumn, are when cambial activity decreases; however, the positive correlation indicates that the warmer the previous autumn, the greater the growth. Favorable temperatures in September and October extend the active growing season and this effect was most noticeable at the NW-oriented sites, where higher soil moisture and less solar radiation are expected (Diaconu, Wassenberg, & Spiecker, 2016).

Precipitation from April to September of the current year explained the BAI with higher correlation values (0.41-0.52) and was also consistent with the RWI (0.33-0.40). This result is expected because it covers the growing season; furthermore, according to information from nearby stations, 83 % of the annual precipitation was recorded in this period. Several authors have pointed out that precipitation is more important than temperature to explain the growth of the rings and this study is consistent with this result (Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva-Díaz, & Barney, 2003; Villanueva et al., 2017); however, the importance of the precipitation factor is accentuated in environments with higher temperatures (Balducci, Deslauriers, Giovannelli, Rossi, & Rathgeber, 2013).

One aspect to highlight is that the information from the weather stations close to the study area indicates a decrease in annual rainfall of 2 mm/yr⁻¹. If this trend continues, it is possible that, in the coming decades, the growth trends between sites, so far detected, will be modified in favor of sites with a greater capacity to retain soil moisture (Gómez-Guerrero & Doane, 2018).

The low-growth periods in this study, around 1960 and 2000, were also reported by Cerano-Paredes et al. (2014) for *Abies religiosa* (Kunth) Schltldl. & Cham. in Michoacán. Although it is difficult to know whether the two events are related, the patterns recorded by conifer growth rings are known to span broad geographic regions (Villanueva-Díaz et al., 2009).

Conclusions

The relatively low intercorrelation between growth ring samples was explained by the temporal and spatial climatic variation between sites and by the fact that they did not exclusively include stressed trees; however, it was possible to know the evolution of tree growth at two different elevations and aspects. The altitude of 3 700 m with southwestern aspect has the greatest potential to respond positively to climate change. The basal area increment, represented by tree age or cambial age, indicated differences in the growth of the trees, based on altitude and aspect. Differences in growth between elevations and aspects highlight

La precipitación de abril y agosto del año actual en especies de menor altitud como *Pinus pseudostrubos* Lindl. y *P. devoniana* Lindl. definen la anchura de anillo, pero el aumento de la temperatura máxima en verano tiene efecto negativo en ambas especies (Marlés et al., 2015); es decir, en altitudes bajas, el efecto del aumento de temperatura puede ser negativo, y positivo en bosques de alta montaña, como el área de estudio.

Edad cambial

La tendencia del IAB con respecto a la edad cambial indica que, independientemente de las condiciones del sitio, los árboles mostraron un patrón biológico común, en el que el periodo juvenil entre 20 y 50 años es el de mayor productividad o de mayor incremento corriente. La baja densidad del arbolado (180 árboles·ha⁻¹), corroborada en sitios de 1 000 m², sugiere que las tendencias observadas no están afectadas por la cercanía entre árboles, ya que implica una distancia media entre árboles de 7.5 m.

Relación del índice de anchura de anillo e incremento del área basal con las variables climáticas

Comparado con el IAB, el IAA fue más sensible a la temperatura incluyendo los meses de octubre y septiembre del año anterior. En estos meses, que corresponden al otoño previo, es cuando la actividad cambial disminuye; sin embargo, la correlación positiva indica que cuanto más cálido es el otoño previo, mayor es el crecimiento. Las temperaturas favorables en los meses de septiembre y octubre amplían la estación de crecimiento activo y este efecto fue más notorio en los sitios orientados al NO, donde se espera que haya mayor humedad del suelo y menor radiación solar (Diaconu, Wassenberg, & Spiecker, 2016).

La precipitación de abril a septiembre del año actual explicó el IAB con valores mayores de correlación (0.41-0.52) y también fue consistente con el IAA (0.33-0.40). Este resultado es el esperado porque abarca la estación de crecimiento; además, de acuerdo con la información de las estaciones cercanas, en este periodo se registró 83 % de la precipitación anual. Varios autores han señalado que la precipitación es más importante que la temperatura para explicar el crecimiento de los anillos y este estudio es congruente con dicho resultado (Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva-Díaz, & Barney, 2003; Villanueva et al., 2017); sin embargo, la importancia del factor precipitación se acentúa en ambientes con temperaturas más altas (Balducci, Deslauriers, Giovannelli, Rossi, & Rathgeber, 2013).

Un aspecto por destacar es que la información de las estaciones meteorológicas, cercanas a la zona

the importance of considering this spatial-temporal variation in models of forest response to climate change.

Acknowledgments

The first author is grateful to Mexico's National Science and Technology Council (CONACyT) for granting her a master's degree scholarship and its program for strengthening indigenous women: Complementary Support for Indigenous Women Holders of a CONACyT Scholarship (2017). Thanks also go to the city council of Jocotitlán, State of Mexico and the *Unión de Ejidos de la Montaña* for access to their forest areas.

End of English version

References / Referencias

- Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., Nava-Bernal G. E., & Gómez-Albores, M. A. (2017). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees*, 31(2), 441–453. doi: 10.1007/s00468-016-1460-z
- Balducci, L., Deslauriers, A., Giovannelli, A., Rossi, S., & Rathgeber, C. B. K. (2013). Effects of temperature and water deficit on cambial activity and woody ring features in *Picea mariana* saplings. *Tree Physiology*, 33(10), 1006–1017. doi: 10.1093/treephys/tpt073
- Begum, S., Kudo, K., Rahman, M. H., Nakaba, S., Yamagishi, Y., & Nabeshima, E. (2018). Climate change and the regulation of wood formation in trees by temperature. *Trees*, 38(1), 1–13. doi: 10.1007/s00468-017-1587-6
- Bernal-Salazar, S., & Terrazas-Salgado, T. (2000). Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques*, 6(1), 73–86. doi: 10.21829/myb.2000.611343
- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002
- Castruita-Esparza, L. U., Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Ramírez-Guzmán, M. E., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2016). Basal area increment series of dominant trees of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco show periodicity according to global climate patterns. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 379–397. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.10.048
- Cerano-Paredes, J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Vázquez, S. L., Trucios, C. R., & Guerra de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 41–54. doi: 10.14350/rig.35190
- Cleveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Díaz, J., & Barney, T. B. (2003). Tree-ring reconstructed

de estudio, indica disminución de la precipitación anual de 2 mm·año⁻¹. De continuar esta tendencia, es posible que, en las próximas décadas, las tendencias de crecimiento entre sitios, hasta ahora detectadas, se modifiquen favoreciendo a los sitios con mayor capacidad para retener humedad en el suelo (Gómez-Guerrero & Doane, 2018).

Los periodos de crecimiento bajo en este estudio, cercanos a los años 1960 y 2000, también los reportaron Cerano-Paredes et al. (2014) para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en Michoacán. Aunque es difícil saber si ambos eventos están relacionados, se sabe que los patrones registrados por los anillos de crecimiento de las coníferas abarcan regiones geográficas amplias (Villanueva-Díaz et al., 2009).

Conclusiones

La intercorrelación relativamente baja entre muestras de anillos de crecimiento se explicó por la variación climática temporal y espacial entre los sitios y por el hecho de no incluir exclusivamente árboles estresados; sin embargo, se pudo conocer la evolución del crecimiento arbóreo a dos altitudes y exposiciones diferentes. La altitud de 3 700 m con exposición suroeste tiene el mayor potencial para responder positivamente al cambio climático. El incremento en área basal, representado con la edad del árbol o con la edad cambial, indicó diferencias de crecimiento de los árboles, con base en la altitud y exposición. Las diferencias en crecimiento entre altitudes y exposiciones resaltan la importancia de considerar esta variación espacio-temporal en los modelos de respuesta de los bosques al cambio climático.

Agradecimientos

La primera autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el otorgamiento de beca de maestría y al programa de fortalecimiento para indígenas: Apoyos Complementarios para Mujeres Indígenas Becarias del CONACyT (2017). Al ayuntamiento de Jocotitlán, Estado de México y a la Unión de Ejidos de la Montaña por las facilidades de acceso a sus áreas forestales.

Fin de la versión en español

- winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59(3), 369–388. doi: 10.1023/A:1024835630188
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37–59. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/handle/10150/261788>
- Cook, E. R., & Peters, K. (1981). The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41, 45–53. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261038/trb-41-045-053.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Castruita-Esparza, L. U., Martínez-Trinidad, T., & Cervantes-Martínez, R. (2014). Análisis dendroclimático de ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el centro de México. *Agrociencia*, 48(5), 537–551. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n5/v48n5a7.pdf>
- Correa-Díaz, A., Silva, L. C. R., Horwath, W. R., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Villanueva-Díaz, J., & Suárez-Espinoza, J. (2019). Linking remote sensing and dendrochronology to quantify climate-induced shifts in high-elevation forests over space and time. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(1), 166–183. doi: 10.1029/2018JG004687
- Correa-Díaz, A., Silva, L. C. R., Horwath, W. R., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Villanueva-Díaz, J., ... Velázquez-Martínez, A. (2020). From trees to ecosystems: Spatiotemporal scaling of climatic impacts on montane landscapes using dendrochronological, isotopic, and remotely sensed data. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(3), e2019GB006325. doi: 10.1029/2019GB006325
- Deslauriers, A., Rossi, S., Anfodillo, T., & Saracino, A. J. T. P. (2008). Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiology*, 28(6), 863–871. doi: 10.1093/treephys/28.6.863
- Diaconu, D., Wassenberg, M., & Spiecker, H. (2016). Variability of European beech wood density as influenced by interactions between tree-ring growth and aspect. *Forest Ecosystems*, 3(1), 1–9. doi: 10.1186/s40663-016-0065-8
- Dixon, P. M. (2006). Bootstrap resampling. In A. H. El-Shaarawi, & W. Piegorisch (Eds.), *Encyclopedia of environmetrics* (pp. 1–9). John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9780470057339
- Dufour, B., & Morin, H. (2013). Climatic control of tracheid production of black spruce in dense mesic stands of eastern Canada. *Tree Physiology*, 33(2), 175–186. doi: 10.1093/treephys/tps126
- ERIC III (2014). Extractor Rápido de Información Climatológica, versión 3.2. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M., & Villanueva-Díaz, J. (2018). Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 191–204. doi: 10.4067/S0717-92002018000200191
- Gómez-Guerrero, A., & Doane, T. (2018). The response of forest ecosystems to climate change. In *Developments in Soils Science*, 35, 185–206. doi: 10.1016/B978-0-444-63865-6.00007-7
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 43, 51–67. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/handle/10150/261223>
- Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2020). Retrieved September 29, 2020 from <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15048a.html>
- Körner, C. (2007). Climatic treelines: conventions, global patterns, causes (Klimatische Baumgrenzen: Konventionen, globale Muster, Ursachen). *Erdkunde* 61(4), 316–324. Retrieved from https://www.jstor.org/stable/25648043?seq=1#page_scan_tab_contents
- Lebourgeois, F. (2007). Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Annals of Forest Science*, 64(3), 333–343. doi: 10.1051/forest:2007010
- Marlés, M. J., Valor, I. T., López, C. B., Pérez, S. D. R., Maneja, Z. R., Sánchez, M. S., & Boada, J. M. (2015). Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca. *Investigaciones Geográficas*, 88, 19–32. doi: 10.14350/rig.43338
- Musálem, M., & Solís, M. J. I. M. (2000). *Monografía de Pinus hartwegii*. México: INIFAP-CIRCE-Campo Experimental Valle de México. Retrieved from <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/handle/123456789/1816>
- Poage, N. J., & Tappeiner, J. C. (2002). Long-term patterns of diameter and basal area growth of old-growth Douglas-fir trees in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(7), 1232–1243. doi: 10.1139/x02-045
- Pompa-García, M., Cerano-Paredes, J., & Fulé, P. Z. (2013). Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia*, 31(3), 198–204. doi: 10.1016/j.dendro.2013.05.003
- R Development Core Team (2007). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Schweingruber, F. H., Kairiukstis, L., & Shiyatov, S. (1990). Sample selection. In E. Cook, & L. Kairiukstis (Eds.), *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences* (pp. 23–35). Netherlands: Springer-Science+Business Media. doi: 10.1007/978-94-015-7879-0
- Villanueva, D. J., Cerano-Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés, M. C., Vázquez, S. L., Yocom, L. L., & Ruíz-Corral, J. A. (2015a). 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, D. J., Cerano-Paredes, J., Selem-Vázquez, L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., ...Ruíz, C. J. A. (2015b). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 86, 5–14. doi: 10.14350/rig.42003
- Villanueva, D. J., Cerano, J., Fulé, P. Z., Cortés, M. C., Vázquez, S. L., Yocom, L. L., & Ruíz-Corral, J. A. (2015c). 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, D. J., Vázquez, S. L., Estrada, A. J., Martínez, S. A. R., Cerano, P. J., Canizales, V. P. A., Franco, R. O., & Reyes, C. F. (2018). Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49), 165–187. doi: 10.29298/rmcf.v9i49.128
- Villanueva, J., Gómez, A., Cerano, J., Rosales, S., Estrada, J., Castruita, L. U., & Martínez, R. A. (2017). La variabilidad del caudal del río Acajoneta inferida mediante series de anillos de crecimiento en coníferas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 55–74. doi: 10.24850/j-tyca-2017-03-04
- Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Cerano-Paredes, J., Estrada, A. J., & Sánchez, C. I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia Forestal en México*, 34(105), 37–69. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000100003
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1-2), 117–131. doi: 10.1007/s10584-006-9144-0
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 836–842. doi: 10.1016/j.foreco.2008.10.021
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431–436. doi: 10.1111/ecog.01335