

Morfometría de copa en plantaciones de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae* en Michoacán, México

Crown morphometry in plantations of *Pinus pseudostrobus* and *Pinus montezumae* in Michoacán, Mexico

Jonathan Hernández-Ramos^{a, b}, Valentín José Reyes-Hernández^{b*}, Aurelio Manuel Fierros-González^b, Enrique Buendía-Rodríguez^c, Gerónimo Quiñonez-Barraza^d, Héctor Manuel De los Santos-Posadas^b

^a Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) - Campo Experimental Chetumal, carretera Chetumal - Bacalar km 25, Xul-Ha, Othón P. Blanco, 77930, Quintana Roo, México, tel.: +52 983 733 17 95, hernandez.jonathan@gmail.com,

* Autor de correspondencia: ^b Colegio de Postgraduados (COLPOS) - Campus Montecillo, carretera México - Texcoco km 36,5, Montecillo, Texcoco, 56230, Estado de México, México, tel.: +52 595 106 6438, amfierros@colpos.mx, hmsantos@colpos.mx, vareyhdz@gmail.com

^c Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP - Campo Experimental Valle de México, carretera los Reyes - Texcoco km 13,5, Apartado Postal 10, Coatlinchán, 56250, Texcoco, Estado de México, México, tel.: +52 595 102 3154, buendia.enrique@inifap.gob.mx

^d Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP - Campo Experimental Valle del Guardiania, carretera Durango-Mezquitil km 45, 34170, Durango, Durango, México, tel.: +52 618 158 7865, gero2723@hotmail.com

SUMMARY

The dimensions and morphological characteristics of a tree canopy are indicators of photosynthetic capacity and are influenced by competition. Morphometric indices (MI) and correlations between dasometric variables can be used in forest management. The objectives of this study were to calculate and correlate some MI, and to model the proportional crown relationship ($pc\%$) as a function of the normal diameter (dn), using mixed effects models (MEM) in forest plantations of *Pinus pseudostrobus* and *P. montezumae*. 11 indices and morphometric values were estimated using information regarding dn , crown projection diameter, clean stem height and total height (A). In addition, a MEM was produced using the classification variables of altitude, exposure and slope, in order to estimate the $pc\%$. The slenderness index (A/dn) and the crown area ratio were 0.65 m cm^{-1} and 31.19 m^2 for *P. pseudostrobus*, and 0.55 m cm^{-1} and 21.85 m^2 in *P. montezumae*, while the dimension of the crown diameter was 25 and 31 times the dn for these two species. The best conditions for development of *P. pseudostrobus* occurred between the elevation intervals of 2,750 - 2,950 m a.s.l., while for *P. montezumae* the west and southwest exposures showed higher values. MI and MEM adjustment offer a valuable tool to calculate essential parameters of forest management and establishment of forest plantations for these two species.

Keywords: photosynthetic capacity, density, mixed effects, morphometric indices, forest management.

RESUMEN

Las dimensiones y características morfológicas de la copa de los árboles son indicadores de la capacidad fotosintética y estas varían por efecto de la competencia en el rodal o plantación. Además, los índices morfométricos (IM) y las asociaciones entre las variables dasométricas pueden ser empleadas dentro de la gestión forestal. Por lo anterior, los objetivos de este estudio fueron calcular y correlacionar algunos IM, y modelar la relación proporcional de copa ($pc\%$) en función del diámetro normal (dn), con modelos de efectos mixtos (MEM) en plantaciones forestales de *Pinus pseudostrobus* y *P. montezumae*, en Michoacán, México. Se estimaron 11 índices y valores morfométricos con datos del dn , diámetro de la proyección de la copa, altura de fuste limpio y altura total (A). También, se ajustó un MEM con las variables clasificatorias de altitud, exposición y pendiente, para estimar la $pc\%$. El índice de esbeltez (A/dn) y el área de proporción de copa fueron de $0,65\text{ m cm}^{-1}$ y $31,19\text{ m}^2$ para *P. pseudostrobus*, y de $0,55\text{ m cm}^{-1}$ y $21,85\text{ m}^2$ en *P. montezumae*, mientras que, la dimensión del diámetro de copa fue 25 y 31 veces el dn para estas dos especies. Las mejores condiciones de desarrollo para *P. pseudostrobus* se presentaron entre los intervalos de elevación de 2.750 - 2.950 m s.n.m., mientras que para *P. montezumae* las exposiciones oeste y suroeste mostraron valores superiores. Los IM y el ajuste por MEM permiten tener una alternativa para calcular parámetros esenciales en la gestión forestal y establecimiento de las plantaciones forestales en estas dos especies.

Palabras clave: capacidad fotosintética, densidad, efectos mixtos, índices morfométricos, gestión forestal.

INTRODUCCIÓN

La copa es una estructura que determina el desarrollo de los árboles, se considera el motor fotosintético de cada individuo que define la producción primaria de las especies. La copa es afectada por cambios ambientales (Li *et al.* 2015) y por la competencia aérea y radicular, por el espacio vertical y horizontal, así como por la luz y los nutrientes (Lang *et al.* 2010) que tienen influencia en la dominancia, vitalidad, estabilidad mecánica y rendimiento de los árboles en un sitio (Cunha y Finger 2013). Los requerimientos fisiológicos de cada individuo ocasionan la poda natural de las ramas en los árboles (Arias 2005), lo que facilita la entrada de luz en el dosel y sotobosque que en consecuencia propician menor competencia y mayor crecimiento radial (Cunha y Finger 2013, Cisneros *et al.* 2019).

La competencia en una población se presenta cuando la disponibilidad de recursos es menor a la demanda que los árboles en conjunto requieren para el crecimiento óptimo (Lang *et al.* 2010). En la gestión forestal es fundamental describir, evaluar y cuantificar la competencia para establecer esquemas de aprovechamiento en rodales o plantaciones forestales (PF) (Hess *et al.* 2016). Además, las dimensiones de copa como: longitud vertical, diámetro promedio, porcentaje con respecto a la altura total del árbol y forma, son utilizados para generar índices de competencia o modelos de interacción entre individuos en un sitio específico (Cunha y Finger 2013), debido a que estas dimensiones se cambian durante el desarrollo y son sensibles a los niveles de competencia de cada sitio forestal.

En virtud de la importancia que representa el conocimiento de la morfometría de la copa y la generación de índices morfométricos (IM) de las dimensiones de copa de los árboles como indicadores de crecimiento, rendimiento, competencia y eficiencia fotosintética, se han desarrollado descripciones morfométricas de especies forestales de interés comercial (Arias 2005, Nájera-Luna y Hernández-Hernández 2008, Castaño *et al.* 2013), así como ecuaciones alométricas de diámetro de copa (dc , m) en función del diámetro normal (dn , cm) (Sanquetta *et al.* 2014), modelos de competencia e interacción entre individuos (Lang *et al.* 2010, Costa *et al.* 2016), aunado a evaluar el crecimiento y adaptación de procedencias (Rodríguez *et al.* 2008) y en rodales de poblaciones fragmentadas (Hess *et al.* 2016), cobertura del dosel en términos de estimación de inventarios forestales (McIntosh *et al.* 2012), mapeo del índice de área foliar y arbórea (Aguirre-Salado *et al.* 2011), y respuesta del crecimiento a la radiación solar en vías de su productividad (Castaño *et al.* 2013).

Por otro lado, el uso de técnicas específicas para cuantificar las interacciones climáticas en la producción primaria neta (Li *et al.* 2015) o la dominancia vertical de los árboles dentro del sitio (Cunha y Finger 2013, Cisneros *et al.* 2019), con la arquitectura del dosel y el crecimiento de las copas, ha conducido a los investigadores a proponer el uso de distintos tipos de análisis estadísticos (Báez-Hernández

et al. 2016, Costa *et al.* 2016, Hess *et al.* 2016, Cisneros *et al.* 2019). De ahí que el análisis de covarianza (ANCOVA) es un ejemplo de lo anterior, y sirve para verificar si las pendientes alométricas de las especies son semejantes, e identificar las interacciones que tienen con la cobertura de copa específica de cada especie (Báez-Hernández *et al.* 2016). Otro ejemplo, es la inclusión de variables clasificatorias (*Dummy*) de acuerdo con la dominancia vertical de los árboles en dominantes, codominantes o suprimidos, para estimar las relaciones morfométricas en *Prosopis alba* Griseb y *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (Costa *et al.* 2016, Hess *et al.* 2016, Cisneros *et al.* 2019).

Otros enfoques que se han utilizado corresponden al ajuste de modelos de efectos mixtos (MEM) en el cual se incluye información adicional, como la riqueza local y funcional de las especies, la competencia y la edad, como variables bióticas, mientras que la pendiente, la inclinación del terreno y la profundidad del suelo como variables abióticas. Esto ha permitido la verificación de la influencia de la dimensión sobre la arquitectura de la copa en cinco especies de un bosque sub-tropical (Lang *et al.* 2010), aunque también la diferenciación de la proporción de copa (pc %) en tres sitios de crecimiento para *Araucaria angustifolia* (Hess *et al.* 2016). Sin embargo, la información disponible en este sentido para la gestión de las plantaciones forestales del género *Pinus* es escasa en México.

En específico, en el estado de Michoacán, México *Pinus pseudostrabus* Lindl. y *P. montezumae* Lamb. son las especies de este género que más se establecen como PF en las 16 mil hectáreas registradas de acuerdo con la CONAFOR (2018), y son las que tienen el mayor potencial de establecimiento dentro del estado para incrementar la productividad maderable (Muñoz *et al.* 2015). En este sentido, es importante destacar que ambas especies son clave en el desarrollo productivo de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), Michoacán, México, ya que se utilizan para el aserrío, la industria mueblera, la resinación y las artesanías (PNUD 2012).

Los objetivos de esta investigación fueron: (1) calcular y correlacionar los índices morfométricos (IM), y (2) modelar la relación proporcional de copa (pc %) en función del dn con modelos de efectos mixtos (MEM) en las PFs de *P. pseudostrabus* y *P. montezumae* en la CINSJP, Michoacán, México. En las hipótesis del trabajo se asumió que (1) la altitud (Alt), exposición (Exp) y pendiente del sitio ($Pend$), tienden a determinar los cambios morfométricos en los árboles de *P. pseudostrabus* y *P. montezumae* establecidos en PFs y (2) que modelar la relación pc % en función del dn con MEM, podría explicar la variabilidad de los IM por condición de crecimiento en las PF de las dos especies.

MÉTODOS

Sitio de estudio. Las PFs establecidas en CINSJP, Michoacán se ubican entre las coordenadas 19° 17' y 19° 30' N y 102° 06' y 102° 17' W y se encuentran en un relieve

de tipo sierra con un intervalo altitudinal de 2.200-2.300 m s.n.m., clima templado húmedo (C_w), con precipitación y temperatura media de 1.500 mm y 15 °C, respectivamente, y suelo de origen volcánico de la unidad andosol, característico de la subprovincia fisiográfica Neovolcánica Tarasca (INEGI 2017).

Procedimiento de campo. La evaluación incluyó a 34 PFs de *Pinus pseudostrobus* de entre siete y 37 años, y 14 de *Pinus montezumae* de siete a 32 años. Se ubicaron 196 sitios cuadrangulares de muestreo de manera sistemática (400 m²), conservando equidistancias de 100 m entre cada unidad de muestreo (UM) de acuerdo con la superficie, forma y condición de cada plantación evaluada. En cada UM se registró la altitud (*Alt*), la exposición (*Exp*) y la Pendiente (*Pend*), y se midió el diámetro normal (*dn*, cm), diámetro de copa (*dc*, m), la altura de fuste limpio (*Afl*, m) y la altura total (*A*, m) de todos los árboles.

Análisis estadísticos. Con la información de campo, se calcularon las estadísticas descriptivas de cada variable de interés, el índice de curtosis (IC) y el coeficiente de asimetría (CA), cuyos valores deben estar entre 3 y -3, respectivamente, para que los datos se puedan considerar como una distribución de error normal (Galán *et al.* 2016). Cabe mencionar que para muestras grandes ($n > 60$), y de acuerdo con el teorema del límite central, los estimadores se aproximan a los de una distribución normal por lo cual se puede asumir normalidad en la muestra (Martínez *et al.* 2014). También, se estimaron variables de morfometría de copa y algunos IM reportados en la literatura especializada (Daniels *et al.* 1986, Nájera-Luna y Hernández-Hernández 2008, Rodríguez *et al.* 2008, Hess *et al.* 2016, Cisneros *et al.* 2019), los cuales se enlistan a continuación:

$$\text{Radio medio de copa (m), } \underline{rc} = \frac{\sum_{i=1}^{n=4} rc}{4} \quad [1]$$

$$\text{Diámetro de copa (m), } \underline{dc} = 2 \times \underline{rc} \quad [2]$$

$$\text{Área de proyección de copa (m}^2\text{), } \underline{apc} = \pi \times \underline{rc}^2 \quad [3]$$

$$\text{Extensión de copa (m), } \underline{ec} = A - \underline{Afl} \quad [4]$$

$$\text{Índice de esbeltez (m cm}^{-1}\text{), } \underline{ie} = A/\underline{dn} \quad [5]$$

$$\text{Índice saliente (cm cm}^{-1}\text{), } \underline{is} = \underline{dc}/\underline{dn} \quad [6]$$

$$\text{Índice de amplitud (m m}^{-1}\text{), } \underline{ia} = \underline{dc}/A \quad [7]$$

$$\text{Forma de copa (m m}^{-1}\text{), } \underline{fc} = \underline{dc}/\underline{ec} \quad [8]$$

$$\text{Proporción de copa (%), } \underline{pc}\% = \frac{\underline{ec}}{\underline{Afl}} \times 100 \quad [9]$$

$$\text{Área de intercepción lumínica de copa (m}^2\text{), } \underline{ailc} = \left(\frac{\pi \underline{rc}}{6 \cdot \underline{ec}^2} \right) \cdot [(4 \times \underline{ec}^2 + \underline{rd}^2)^{2/3} - \underline{rc}^3] \quad [10]$$

$$\text{Índice de competencia, } \underline{ic}_j = \frac{\underline{dn}_j^2 \times n}{\sum_i \underline{dn}_i^2} \quad [11]$$

La estimación del \underline{ic}_j de un árbol con respecto a los vecinos dentro de cada sitio, implica la medición de los diámetros normales de los árboles dentro del sitio (competidores) (\underline{dn}_i), además del valor del individuo de mayor diámetro como dimensión objetivo (\underline{dn}_j) (Álvarez *et al.* 2003, Hess *et al.* 2016); \underline{ic}_j es considerado un índice de competencia independiente de la distancia (Daniels *et al.* 1986).

Se realizó además un análisis de correlación de *Pearson* para identificar a las variables con mayor relación entre sí y que puedan contribuir a describir las condiciones actuales en las PFs. También, se consideraron como variables interactuantes y con efecto aquellas con correlaciones con valores mayores a 0,6 ($P < 0,05$) (Hess *et al.* 2016).

Para modelar la relación entre el porcentaje de copa ($\underline{pc}\%$), en función del \underline{dn} , se utilizó un modelo lineal (ML) [12] con tres estructuras para ser ajustadas bajo el enfoque de ML mixto (MLM) con el paquete R® y la herramienta *lm* (Cayuela 2018). También se ajustó un modelo de efectos mixtos (MEM) para estimar de forma conjunta los parámetros específicos de cada agrupación, por lo que el error, la varianza y el valor de los parámetros son específicos por nivel (Correa y Salazar 2016).

$$\underline{pc}\% = a + b \times \underline{dn} \quad [12]$$

donde, $\underline{pc}\%$: proporción del dosel, \underline{dn} : diámetro normal, a y b : parámetros a estimar.

La inclusión de los efectos aleatorios, que representan a los distintos niveles de clasificación de las variables *Alt*, *Exp* y *Pend* dentro del MEM, asumió tres supuestos: (1) que la pendiente del modelo (b) de $\underline{pc}\%$ es la misma para todas las condiciones, pero el intercepto es variable [13,1]; (2) que el intercepto es constante, pero la pendiente es afectada por las variables de agrupación mencionadas [13,2]; y (3) que ni la constante ni la pendiente son las mismas para todas las condiciones analizadas [13,3]. La inclusión de los efectos (ϵ) en los MEM, se realizó para estimar el efecto aleatorio de distintos niveles muestreados a través del sitio, el cual tiene un intervalo de posibles niveles de agrupación para cada variable de clasificación (*ie Alt*, *Exp* o *Pend*), por lo que, se margina el valor específico para condición evaluada y se expresa de la manera siguiente:

$$\underline{pc}\% = a_j + b \cdot \underline{dn} + \epsilon_{ij} \quad \epsilon_{ij} \sim N(0, \theta^2) \quad [13,1]$$

$$\underline{pc}\% = a + b_j \cdot \underline{dn} + \epsilon_{ij} \quad \epsilon_{ij} \sim N(0, \theta^2) \quad [13,2]$$

$$\underline{pc}\% = a_j + b_j \cdot \underline{dn} + \epsilon_{ij} \quad \epsilon_{ij} \sim N(0, \theta^2) \quad [13,3]$$

donde, pc %: proporción del dosel, dn : diámetro normal, a y b : parámetros a estimar, j_i : efecto aleatorio relacionado a las covariables, N : número de observaciones, y θ^2 : varianza residual. ε_{ij} : error.

La inclusión de las covariables dentro de los MEM se realizó como variables categóricas de clasificación por nivel (*ie Exp*: Cenital, N, NE, E, SE, S, SW, W, NW; *Pend*: < 5 %, > 5 %, < 10 %, > 10 %; y *Alt*: 2.000, 2.100, 2.200, 2.300, 2.400, 2.500, 2.600, 2.700, 2.800, 2.900 y 3.000 m s.n.m.), para así obtener a través del mejor predictor lineal imparcial empírico (*EBLUP's*, por sus siglas en inglés) un valor específico en los parámetros aleatorios por agrupación propuesta (Correa y Salazar 2016, Cayuela 2018).

Los MEM asumen distribución normal con media igual a cero y una matriz de varianzas-covarianzas idónea para englobar la variabilidad de la muestra por nivel de agrupación: $Var[Y] = R = R_{\mu}^{0,5} A R_{\mu}^{0,5}$, donde R_{μ} es una matriz diagonal cuya ii es un elemento diagonal $V_{ar_{(i)}}$ en función de varianza para la observación i ; $R_{\mu}^{0,5}$ es una matriz diagonal de raíces cuadradas de los elementos correspondientes de R_{μ} , y A es la matriz de parámetros de escala (Littell *et al.* 2006).

La selección del modelo más adecuado se sustentó en los criterios de información de Akaike y Bayesiano (*AIC* y *BIC*), además del valor de verosimilitud del modelo (*logLik*). La significancia ($P < 0,05$) de todos los parámetros también se consideró en el análisis (Galán *et al.* 2016, Correa y Salazar 2016). Además, a las estructuras seleccionadas como las mejores se les verificó la normalidad y la homocedasticidad de forma gráfica, al considerar una distribución de frecuencias normal y homocedástica de los residuales (Galán *et al.* 2016, Cayuela 2018). De manera adicional y debido a que la muestra es mayor a 60, para verificar de forma estadística el primer supuesto se realizó el test de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) (*D*), mientras que la distribución de los residuales se verificó mediante el test Goldfeld-Quandt (*GQ*) (Martínez *et al.* 2014). El planteamiento de la hipótesis nula (H_0) fue que los residuos se distribuyen de forma normal y homocedástica, mientras que la hipótesis alternativa (H_a) señala que los residuales no siguen una distribución normal y se distribuyen de manera heterocedástica, ambas a un nivel de confiabilidad de 95 % ($P < 0,05$).

RESULTADOS

Ninguna de las variables registradas en campo presentó problemas de distribución por presentar valores del IC y CA entre 3,0 y -0,7. Los valores promedio de dt , dn , A , Afl y dc para *P. pseudostrobus* fueron de 32,23 cm, 26,16 cm, 15,35 m, 6,15 m y 5,83 m, mientras que en *P. montezumae* fueron de 22,25 cm, 17,44 cm, 9,31 m, 3,30 m y 4,88 m. El *ie* para *P. pseudostrobus* indicó que por cada centímetro que aumenta el dn el incremento en A es de 0,62 m, en tanto que, para *P. montezumae* el aumento fue de 0,55 m (cuadro 1).

El área de proyección de la copa (apc : m²), es un reflejo de la densidad del rodal y de las dimensiones de los individuos (ec y fc). El valor de apc fue superior para *P. pseudostrobus* con 31,19 m², y para *P. montezumae* fue de 21,85 m². Las estimaciones de la proporción de copa en porcentaje (pc %), área de intercepción lumínica de copa ($ailc$) y el índice de competencia (ic_j) fueron mayores para *P. pseudostrobus* que para *P. montezumae* (cuadro 1).

Para *Pinus pseudostrobus*, la A , Afl , dc , rc , apc , ec y $ailc$ tienen una correlación positiva > 0,60 con el dn , e incrementan a medida que el dn aumenta. De igual manera, en todos los casos se obtuvieron correlaciones positivas entre el área de intersección lumínica de copa ($ailc$: m²) con dn , A , dc , rc , ec y apc (> 0,80); el área de proyección de copa (apc) con el dc y rc (> 0,90); la A con la Afl , dc y ec (> 0,60); y la forma de copa (fc) con is e ia (> 0,60) (cuadro 2).

En *Pinus montezumae*, las correlaciones positivas fueron mayores a 0,70 para ia , fc y is ; dn con A , ec y $ailc$ (> 0,60); el $ailc$ con la A , ec , dc , rc y apc (> 0,70); A , ec y pc % (> 0,60); apc y dc (> 0,90); y la A con la Afl (> 0,60). Sin embargo, el índice de competencia (ic_j) tiene una correlación negativa con el dn y A , lo que indica que el incremento de estas dos últimas variables tiene un efecto de reducción en el valor del Ic_j (cuadro 2).

El is , obtenido para *P. pseudostrobus* indica que el dc es en promedio 25 veces el dn , y 31 veces en el caso de *P. montezumae*. Por ejemplo, un árbol de *Pinus montezumae* con 35 cm de dn tendría 10,85 m de dc , y bajo el supuesto de copas redondeadas, la densidad en la cual teóricamente no existe ninguna competencia lateral entre las copas es de aproximadamente 108 individuos por hectárea, ya que no se consideran los espacios sin cobertura arbórea entre los individuos; para *Pinus pseudostrobus*, con estas mismas dimensiones el dc será de 8,75 m y la densidad óptima de crecimiento sería de 166 árboles ha⁻¹.

Los resultados del ajuste de los modelos lineal (ecuación 12) y con efectos mixtos (ecuaciones 13,1, 13,2 y 13,3) para las dos especies, mostraron parámetros diferentes de cero ($P < 0,05$). El enfoque con MEM, en comparación con mínimos cuadrados ordinarios (MCO), permite obtener parámetros específicos para cada nivel de agrupación. Además, se puede distinguir una contribución porcentual al utilizar la expresión 13,3 en ambas especies en los valores *AIC*, *BIC* y *logLik* de 1,25 %, 0,63 % y 1,47 %, respectivamente, para *P. pseudostrobus*, mientras que en *P. montezumae* es de 1,79 %, 1,15 % y 2,04 % (cuadros 2 y 3).

El ajuste con MEM para *P. pseudostrobus*, muestra que la inclusión del efecto aleatorio en ambos parámetros, la covariable *Alt*, es la que contribuye con más efecto sobre la variable pc % (cuadro 3, covariable *Alt*, modelo 13,3). Esta situación indica que tanto el intercepto (a) como la pendiente (b) del modelo son diferentes para cada nivel de clasificación por altitud (cuadro 3), y que es entre 2.750 a 2.950 m s.n.m. donde la especie tiene las mejores

condiciones de crecimiento y desarrollo de copa, por lo cual presenta las mayores dimensiones (figura 1A).

Para *P. montezumae*, la exposición (*Exp*) es la covariable que tiene un mayor efecto en la *pc %*, dado que, tanto el valor del intercepto (*a*), como la pendiente (*b*) son distintos en cada nivel de clasificación de la covariable (cuadro 4: covariable *Exp*, modelo 13,3). Además, se observa que en las exposiciones oeste y suroeste en donde se obtiene el mejor desarrollo de las copas para esta especie (figura 1B).

Al verificar los supuestos de regresión de las expresiones seleccionadas para *P. pseudostrobus* (cuadro 3, covariable *Alt*, modelo 13,3) y *P. montezumae* (cuadro 4: covariable *Exp*, modelo 13,3), se observa una distribución tendiente a la normal (figuras 1, A y C) y homocedástica de los residuales (figuras 1, B y D). Esta situación se ratifica de manera estadística, ya que en las pruebas de Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) (*D*) y Goldfeld-Quandt (*GQ*) los valores de prueba resultaron no significativos por lo que se acepta H_0 y se rechaza hipótesis alternativa (H_a) para ambas especies (figura 2).

Los parámetros del modelo aportaron efecto en las dos especies de *Pinus* (cuadro 5). Además, el valor específico

de cada uno de estos por especie y nivel de agrupación estimados con la función *EBLUP'S* se muestra en el cuadro 6.

En la relación entre la categoría diamétrica y el *pc %* de cada especie, se muestra que *P. pseudostrobus* entre 2.750 a 2.950 m de altitud, y *P. montezumae* en las exposiciones oeste y suroeste, es donde dichas especies tienen más crecimiento y desarrollo de copa (figura 2).

DISCUSIÓN

El análisis de la morfometría de copa mostró correlaciones positivas en las dimensiones del diámetro de copa (*dc*), radio de copa (*rc*), área de proyección de copa (*apc*) y área de intercepción lumínica de copa (*ailc*) para *P. pseudostrobus* y *P. montezumae*, por lo que pueden ser considerados como indicadores para la gestión forestal (Hess *et al.* 2016). Además, condiciones de alta densidad o de competencia dentro de la plantación al parecer propicia mayor crecimiento en altura total (*A*) y menor desarrollo lateral de los árboles, situación que causa una reducción de los valores del *apc* y *ailc*, y las copas pueden ser asimétricas (Lang *et al.* 2010). En cambio, los árboles que crecen en PF en donde hay menor crecimiento en las dimensiones de

Cuadro 1. Características dimensionales e índices morfométricos para arboles establecidos en plantaciones forestales de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae*.

Dimensional characteristics and morphometric indices for trees established in *Pinus pseudostrobus* and *Pinus montezumae* forest plantations.

<i>Pinus pseudostrobus</i>														
Estadístico / Variable	<i>dn</i>	<i>A</i>	<i>Afl</i>	<i>dc</i>	<i>rc</i>	<i>apc</i>	<i>ec</i>	<i>ie</i>	<i>is</i>	<i>ia</i>	<i>fc</i>	<i>pc %</i>	<i>ailc</i>	<i>Ic_j</i>
Mínimo	2,5	1,3	1,0	0,13	0,09	0,09	0,3	0,18	0,02	0,09	0,09	8,33	0,02	1,06
Máximo	72,3	43,4	26,0	14,35	7,18	161,73	28,0	2,2	1,19	1,85	6,5	92,31	860,57	5,3
Media	26,16	15,35	6,15	5,83	2,91	31,19	9,2	0,62	0,25	0,43	0,75	59,95	131,42	1,93
<i>DS</i>	12,482	7,372	3,92	2,397	1,202	22,942	4,729	0,171	0,111	0,2	0,438	12,444	93,886	0,684
<i>IC</i>	-0,49	-0,69	1,11	0,07										
<i>CA</i>	0,05	0,16	1,08	0,01										
<i>Pinus montezumae</i>														
Estadístico / Variable	<i>dn</i>	<i>A</i>	<i>Afl</i>	<i>dc</i>	<i>rc</i>	<i>apc</i>	<i>ec</i>	<i>ie</i>	<i>is</i>	<i>ia</i>	<i>fc</i>	<i>pc %</i>	<i>ailc</i>	<i>Ic_j</i>
Mínimo	1,85	1,4	1,0	0,38	0,19	0,11	0,4	0,15	0,05	0,11	0,13	10,0	0,43	0,03
Máximo	46,4	29,0	11,0	13,66	6,83	146,51	22,0	1,74	3,39	3,86	9,82	86,49	458,79	8,87
Media	17,44	9,31	3,3	4,88	2,44	21,85	6,01	0,55	0,31	0,59	1,03	62,06	71,97	3,08
<i>DS</i>	7,04	4,08	1,35	1,99	1,0	18,261	3,3	0,162	0,172	0,326	0,752	12,567	55,05	2,624
<i>IC</i>	0,06	1,26	2,86	1,14	1,14									
<i>CA</i>	0,49	0,91	1,22	0,73	0,73									

DS: desviación estándar; *IC*: índice de curtosis; *CA*: coeficiente de asimetría; *dn*: diámetro normal (cm); *A*: altura total (m); *Afl*: altura de fuste limpio (m); *dc*: diámetro de copa (cm); *rc*: radio medio de copa (m); *apc*: área de proyección de copa; *ec*: extensión de copa (m); *ie*: índice de esbeltez (m/cm); *is*: índice saliente (cm cm⁻¹); *ia*: Índice de amplitud (m m⁻¹); *fc*: forma de copa (m m⁻¹); *pc %*: proporción de copa en porcentaje; *ailc*: área de intersección de lumínica de copa (m²); *Ic_j*: índice de competencia.

Cuadro 2. Matriz de correlaciones entre características de copa e índices morfométricos.

Correlation between crown characteristics and morphometric indices.

<i>Pinus pseudostrabus</i>														
	<i>dn</i>	<i>A</i>	<i>Afl</i>	<i>dc</i>	<i>rc</i>	<i>apc</i>	<i>ec</i>	<i>ie</i>	<i>is</i>	<i>ia</i>	<i>fc</i>	<i>pc %</i>	<i>ailc</i>	<i>Icj</i>
<i>dn</i>	1													
<i>A</i>	0,83	1												
<i>Afl</i>	0,66	0,82	1											
<i>dc</i>	0,76	0,64	0,50	1										
<i>rc</i>	0,76	0,64	0,50	0,99	1									
<i>apc</i>	0,70	0,58	0,47	0,96	0,96	1								
<i>ec</i>	0,76	0,88	0,45	0,58	0,58	0,51	1							
<i>ie</i>	-0,36	0,12	0,14	-0,31	-0,31	-0,25	0,07	1						
<i>is</i>	-0,50	-0,44	-0,34	0,08	0,08	0,09	-0,40	0,16	1					
<i>ia</i>	-0,27	-0,49	-0,40	0,23	0,23	0,21	-0,43	-0,40	0,79	1				
<i>fc</i>	-0,21	-0,39	-0,11	0,17	0,17	0,17	-0,51	-0,32	0,62	0,81	1			
<i>pc %</i>	0,05	0,00	-0,53	0,08	0,08	0,02	0,44	-0,08	0,02	0,03	-0,40	1		
<i>ailc</i>	0,80	0,82	0,49	0,83	0,83	0,83	0,87	-0,07	-0,20	-0,17	-0,24	0,28	1	
<i>Icj</i>	-0,50	-0,48	-0,39	-0,44	-0,44	-0,36	-0,42	0,13	0,22	0,14	0,13	0,00	-0,42	1

<i>Pinus montezumae</i>														
	<i>dn</i>	<i>A</i>	<i>Afl</i>	<i>dc</i>	<i>rc</i>	<i>apc</i>	<i>ec</i>	<i>ie</i>	<i>is</i>	<i>ia</i>	<i>fc</i>	<i>pc %</i>	<i>ailc</i>	<i>Icj</i>
<i>dn</i>	1													
<i>A</i>	0,80	1												
<i>Afl</i>	0,59	0,69	1											
<i>dc</i>	0,41	0,35	0,10	1										
<i>rc</i>	0,41	0,35	0,10	0,99	1									
<i>apc</i>	0,32	0,26	0,04	0,96	0,96	1								
<i>ec</i>	0,74	0,95	0,44	0,40	0,40	0,31	1							
<i>ie</i>	-0,25	0,30	0,14	-0,12	-0,12	-0,11	0,31	1						
<i>is</i>	-0,43	-0,33	-0,39	0,49	0,49	0,52	-0,25	0,18	1					
<i>ia</i>	-0,31	-0,47	-0,45	0,57	0,57	0,60	-0,40	-0,31	0,83	1				
<i>fc</i>	-0,32	-0,51	-0,24	0,25	0,25	0,29	-0,53	-0,35	0,56	0,76	1			
<i>pc %</i>	0,31	0,45	-0,26	0,38	0,38	0,32	0,66	0,24	0,08	-0,05	-0,51	1		
<i>ailc</i>	0,68	0,80	0,34	0,76	0,76	0,73	0,84	0,14	0,08	0,02	-0,19	0,56	1	
<i>Icj</i>	-0,61	-0,61	-0,48	-0,10	-0,10	-0,02	-0,55	-0,07	0,41	0,44	0,34	-0,20	-0,39	1

*Todos los valores de correlación de *Pearson* superiores a 0,60 y -0,60 presentaron efecto a un nivel de $\alpha = 0,05$. *dn*: diámetro normal (cm); *A*: altura total (m); *Afl*: altura de fuste limpio (m); *dc*: diámetro de copa (cm); *rc*: radio medio de copa (m); *apc*: área de proyección de copa; *ec*: extensión de copa (m); *ie*: índice de esbeltez (m/cm); *is*: índice saliente (cm cm⁻¹); *ia*: Índice de amplitud (m m⁻¹); *fc*: forma de copa (m m⁻¹); *pc %*: proporción de copa en porcentaje; *ailc*: área de intersección de luminica de copa (m²); *Icj*: índice de competencia.

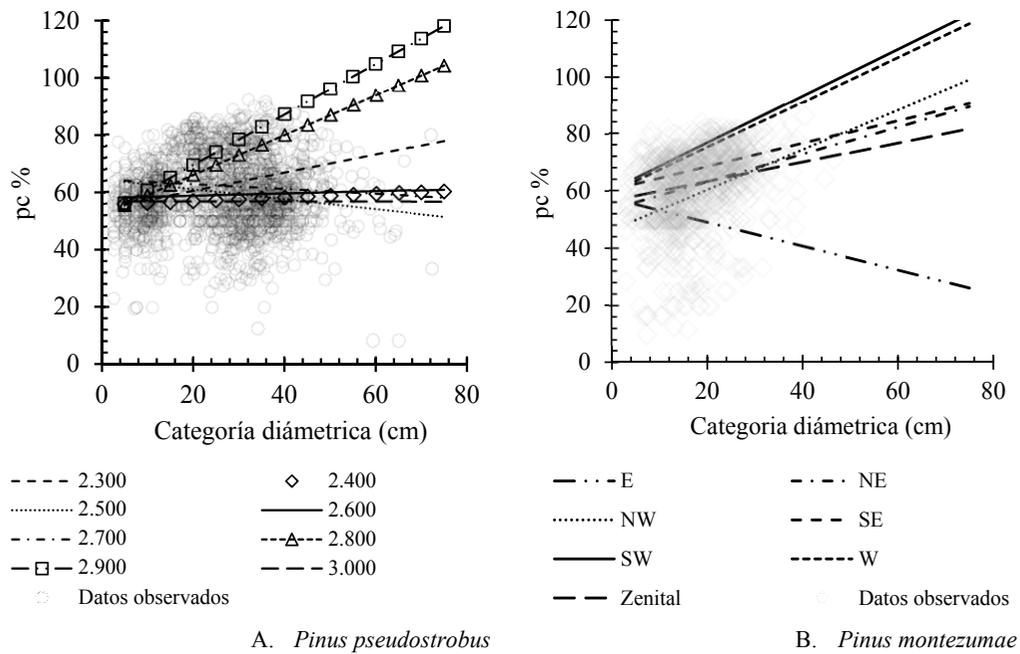


Figura 1. Estimación de la proporción de copa en porcentaje (*pc %*) en árboles establecidos en plantaciones de *Pinus pseudostrobus* al emplear la variable de clasificación de altitud expresada en m (A) y *Pinus montezumae* con un nivel de agrupación por exposición (B).

Estimation of the crown proportion in percentage (*pc %*) in trees established in *Pinus pseudostrobus* plantations using the altitude classification variable expressed in m (A) and *Pinus montezumae* with a grouping level by exposure (B).

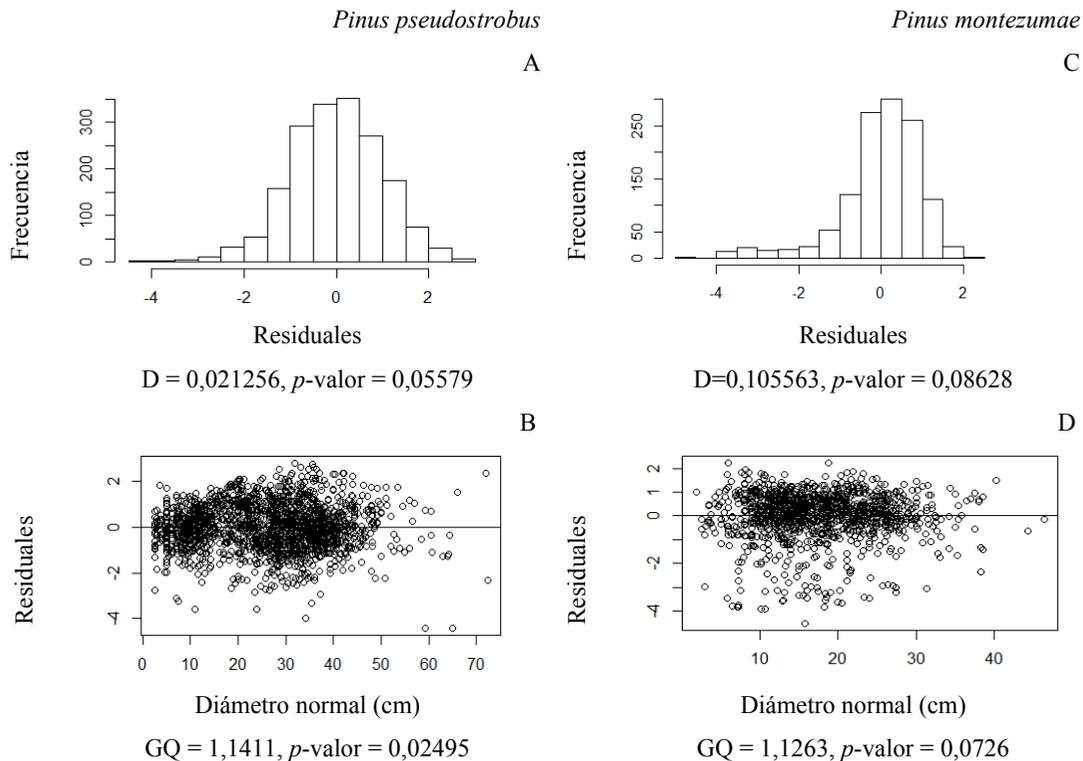


Figura 2. Análisis gráfico y estadístico de normalidad (A y C) y homoscedasticidad (B y D) de los modelos seleccionados para estimar la proporción de copa en porcentaje (*pc %*) en árboles de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae* establecidos en plantaciones forestales.

Graphic analysis of normality (A and C) and homoscedasticity (B and D) of the selected models used to estimate crown proportion in percentage (*pc %*) in *Pinus pseudostrobus* and *Pinus montezumae* trees established in forest plantations.

diámetro normal (*dn*) y *dc* por el efecto de la competencia dentro del sitio, deberán ser sujetos a prácticas silvícolas como los aclareos, los cuales promoverían crecimiento del *dn* y el *dc*.

Lo anterior, debido a que entre mayores sean los valores en *rc*, *dc*, *apc* y *ailc*, el área fotosintética del árbol recibirá mayor radiación y su capacidad de crecimiento se incrementará (Rodríguez *et al.* 2008). Estas características del dosel son componentes de la producción primaria neta de los árboles, reflejo de su vigor y rendimiento (Schoemaker *et al.* 1999), por lo que, para evitar una reducción en las tasas de crecimiento, es indispensable disminuir la densidad y aumentar el espacio disponible para el desarrollo de cada individuo, acorde a las necesidades de los rodales (McIntosh *et al.* 2012, Hess *et al.* 2016).

Por otro lado, los indicadores de índice saliente (*is*) e índice de competencia (*icj*) disminuyen y el *dn* incrementa a medida que los árboles son más longevos, situación semejante a lo registrado por Nájera-Luna y Hernández-Hernández (2008) al describir la morfometría de copa de *P. cooperi* C.E. Blanco y *P. leiophylla* Schl. & Cham. en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango, México, así como con resultados de Cisneros *et al.* (2019) para *Prosopis alba* Griseb en bosques nativos de la zona Centro-Norte de Argentina, tendencia que se mantiene aun cuando las especies son de géneros distintos y presentan hábitos de crecimiento diferentes.

El manejo de la densidad específica para cada sitio a través de los índices morfométricos (*IM*), se fundamenta en que a medida que incrementa la competencia por espacio

Cuadro 3. Estadísticos de ajuste con efectos mixtos para el modelo de proporción de copa en porcentaje (*pc %*) en árboles de *Pinus pseudostrobus* establecidos en plantaciones forestales.

Adjustment statistics with mixed effects for the model of crown proportion in percentage (*pc %*) in *Pinus pseudostrobus* trees established in forest plantations.

Covariable	Modelo	Parámetro de efecto	Variable	Valor de F	Pr(F)	AIC	BIC	logLik	
Alt	13,1	ML		4,0823	0,04348	14209,25	14225,74	-7101,62	
			<i>dn</i>	4,4115	0,03584	14077,36	14137,83	-7027,68	
		a	<i>factor (Alt)</i>	19,1577	< 0,001				
			<i>dn</i>	4,4483	0,03507	14062,39	14122,86	-7020,20	
		b	<i>factor (Alt)</i>	21,1864	< 0,001				
			<i>dn</i>	4,5433	0,03318	14032,25	14136,70	-6997,13	
	13,3	a y b	<i>factor (Alt)</i>	19,7297	< 0,001				
			<i>dn:factor (Alt)</i>	7,6921	< 0,001				
			<i>dn</i>	4,2267	0,03994	14151,55	14195,53	-7067,78	
	Exp	13,1	a	<i>factor (Exp)</i>	13,7424	< 0,001			
				<i>dn</i>	4,1683	0,04133	14176,63	14220,61	-7080,31
		13,2	b	<i>factor (Exp)</i>	8,5916	< 0,001			
<i>dn</i>				4,4150	0,0358	14077,94	14149,40	-7025,97	
13,3		a y b	<i>factor (Exp)</i>	14,3550	< 0,001				
			<i>dn:factor(Exp)</i>	17,0030	< 0,001				
Pend		13,1	a	<i>factor (Pend)</i>	11,6640	< 0,001			
				<i>dn</i>	4,1790	0,04107	14171,03	14209,51	-7078,52
	13,2	b	<i>factor (Pend)</i>	9,2485	< 0,001				
			<i>dn</i>	4,1571	0,04161	14180,50	14218,98	-7083,25	
	13,3	a y b	<i>factor (Pend)</i>	11,7141	< 0,001				
			<i>dn:factor (Pend)</i>	2,9194	0,02019				

AIC y BIC: criterios de información de Akaike y Bayesiano; logLik: valor de log-verosimilitud del modelo.

Cuadro 4. Estadísticos de ajuste con efectos mixtos del modelo de proporción de copa en porcentaje (*pc %*) en árboles de *Pinus montezumae* establecidos en plantaciones forestales.

Adjustment statistics with mixed effects for the model of crown proportion in percentage (*pc %*) in *Pinus montezumae* trees established in forest plantations.

Covariable	Modelo	Parámetro de efecto	Variable	Valor de <i>F</i>	<i>AIC</i>	<i>BIC</i>	<i>logLik</i>
		ML		133,710	9594,9	9610,3	-4794,5
<i>Alt</i>	13,1	<i>a</i>	<i>dn</i>	141,115	9535,6	9586,8	-4757,8
			<i>factor (Alt)</i>	10,715			
	13,2	<i>b</i>	<i>dn</i>	140,968	9536,9	9588,0	-4758,4
			<i>factor (Alt)</i>	10,522			
	13,3	<i>a y b</i>	<i>dn</i>	145,757	9502,7	9589,7	-4734,4
			<i>dn:factor (Alt)</i>	6,737			
<i>Exp</i>	13,1	<i>a</i>	<i>dn</i>	152,289	9440,9	9486,9	-4711,4
			<i>factor (Exp)</i>	29,437			
	13,2	<i>b</i>	<i>dn</i>	152,360	9440,3	9486,4	-4711,2
			<i>factor (Exp)</i>	29,540			
	13,3	<i>a y b</i>	<i>dn</i>	155,233	9423,3	9500,0	-4696,6
			<i>dn:factor (Exp)</i>	4,938			
<i>Pend</i>	13,1	<i>a</i>	<i>dn</i>	136,784	9570,0	9600,7	-4779,0
			<i>factor (Pend)</i>	10,407			
	13,2	<i>b</i>	<i>dn</i>	135,328	9583,1	9613,8	-4785,6
			<i>factor (Pend)</i>	5,952			
	13,3	<i>a y b</i>	<i>dn</i>	140,373	9541,1	9587,1	-4761,5
			<i>dn:factor (Pend)</i>	11,716			

AIC y *BIC*: criterios de información de Akaike y Bayesiano; *logLik*: valor de *log*-verosimilitud del modelo. En todos los casos el valor de probabilidad de *F* resultado < 0,001.

Cuadro 5. Valor de los parámetros del modelo 13,3 con lo cual se estimó la proporción de copa en porcentaje (*pc %*) de árboles establecidos en plantaciones de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae*.

Value of the parameters of the model 13.3 with which the percentage crown proportion (*pc %*) of trees established in *Pinus pseudostrobus* and *Pinus montezumae* plantations was estimated.

Especie	Parámetros	Estimación	Error estándar	Valor <i>t</i>	Pr (> <i>F</i>)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	<i>a</i>	55,81298	2,61348	21,35583	< 0,001
	<i>b</i>	0,35232	0,15814	2,22792	0,026
<i>Pinus montezumae</i>	<i>a</i>	56,195	2,69483	20,85291	< 0,001
	<i>b</i>	0,44787	0,19452	2,30243	0,0215

Cuadro 6. Valor de los parámetros específicos de la ordenada al origen (*a*) y la pendiente del modelo (*b*) por cada nivel de agrupación para estimar la proporción de copa en porcentaje (*pc %*) en arboles de *Pinus pseudostrabus* y *Pinus montezumae*.

Value of the specific parameters of the ordinate to the origin (*a*) and the slope of the model (*b*) for each grouping level to estimate the crown proportion in percentage (*pc %*) in *Pinus pseudostrabus* and *Pinus montezumae*.

<i>Pinus pseudostrabus</i>			<i>Pinus montezumae</i>		
Parámetros específicos			Parámetros específicos		
Altitud (m s.n.m.)	<i>a</i>	<i>b</i>	Exposición	<i>a</i>	<i>b</i>
2.300	54,02	0,31	Este	57,34	-0,42
2.400	55,46	0,06	Noreste	53,49	0,48
2.500	64,40	-0,17	Noroeste	46,21	0,70
2.600	57,90	0,04	Sureste	60,29	0,41
2.700	64,36	-0,08	Suroeste	60,23	0,83
2.800	51,94	0,70	Oeste	59,37	0,79
2.900	51,64	0,89	Cenital	56,45	0,34
3.000	56,71	0,56			

aéreo y se reduce la entrada de luz hacia dentro del rodal, el crecimiento en *dn* disminuye y la copa se hace más pequeña si cesa el crecimiento en *A* y la densidad provoca poda natural. Esto es más evidente sobre todo en especies intolerantes, lo que repercute en el rendimiento (volumen maderable: m³ ha⁻¹, biomasa o carbono: Mg ha⁻¹), por lo cual su aplicación es confiable para masas forestales homogéneas y coetáneas, tamaño y tasa de crecimiento (McIntosh *et al.* 2012, Cunha y Finger 2013, Cisneros *et al.* 2019)

Considerando el índice de esbeltez (*ie* m cm⁻¹), se puede indicar que *P. montezumae* (*ie* = 0,55) es más estable biomecánicamente a daños por vientos, huracanes o nevadas, en comparación con *P. pseudostrabus* (*ie* = 0,65), debido a que valores de *ie* cercanos a cero se asocian a fustes con forma cilíndrica y valores cercanos a la unidad corresponden a fustes cónicos (Arias 2005, Nájera-Luna y Hernández-Hernández 2008).

Por otro lado, el incremento en *A* de 0,55 cm con respecto al aumento en el *dn* para *P. montezumae*, es bajo en comparación con lo reportado para PFs de *P. caribaea* var. *hondurensis* (*ie* = 0,62) en la región sur de Costa Rica (Arias 2005), aunque semejante al reportado para un bosque coetáneo de *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. (*ie* = 0,55) y *P. cooperi* Blanco (*ie* = 0,55) en Durango, México (Nájera-Luna y Hernández-Hernández 2008). En cambio, para *P. pseudostrabus* el incremento en *A* de 0,65 cm con respecto al *dn* fue superior a los mencionados, pero inferior al reportado por López y Nieto (2019) para *P. patula* Schl. et Cham. (*ie* = 0,73) en un bosque de pino en Tlalnepantla, Morelos, México.

Los valores promedio en la forma de copa (*fc*) son bajos para *P. pseudostrabus* (0,75) y *P. montezumae* (1,03) en comparación con lo reportado por Cisneros *et al.* (2019)

para *Prosopis alba* en tres localidades del Centro-Norte de Argentina (*fc*: 1,4, 1,9 y 2,0), situación que puede ser atribuible a las diferentes dinámicas y condiciones de crecimiento que requiere esta especie. Sin embargo, estos valores también son inferiores con lo reportado por Hess *et al.* (2016) para *Araucaria angustifolia* en dos sitios de crecimiento en el sur de Brasil (*fc*: 2,3 y 2,5). En tanto, los valores obtenidos para *P. montezumae* son semejantes a lo reportado por Nájera-Luna y Hernández-Hernández (2008) para *P. cooperi* en Durango, México (*fc*: 0,96), mientras que para *P. pseudostrabus* fueron semejantes a lo reportado por estos autores para *P. leiophylla* (*fc*: 0,75). Además, los valores de *fc* indican que las copas en general son esbeltas (no achatadas), aun con una alta capacidad fotosintética y productividad (Cisneros *et al.* 2019). Lo anterior se puede relacionar con el turno técnico en altura (Incremento corriente anual = Incremento medio anual), en el cual la copa tiende a adquirir una forma más plana y extendida, por lo que lo que la tasa de asimilación de nutrimentos se reduce y posteriormente el rendimiento maderable de las especies.

En este sentido, la tasa de asimilación de nutrimentos y el rendimiento maderable de cada individuo en una plantación forestal estarán en función de una disminución del valor en el *fc* a medida que incremente la *A*, aunado a la reducción de competencia a lo largo de la vida de los árboles, así como de la etapa de desarrollo de cada individuo o intensidad de las prácticas silvícolas aplicadas previamente (McIntosh *et al.* 2012, Costa *et al.* 2016). De esta forma, para decidir qué individuo se requiere remover por aclareo o corta entre dos árboles de la misma especie en etapa de fustal y similar dominancia vertical (*e.g.* dominantes, codominantes o intermedios), cuyas dimensiones de *dn* y *dc* son semejantes, el criterio principal será cortar el de mayor

fc, puesto que es un indicador de copas con forma elipsoide, plana o umbela (Costa *et al.* 2016).

Respecto a los valores morfométricos registrados, su reducción muestra un dosel con copas cónicas y de mayor productividad, debido a que la arquitectura de copa está mejor distribuida dentro del dosel (Hess *et al.* 2016), en donde la *A* es superior y la eficiencia fotosintética es mayor con una misma *apc* e igual proporción de copa en porcentaje (*pc %*). Sin embargo, en los árboles jóvenes (*e.g.* brinzal, monte bravo, vardascal o latizal) el crecimiento en *A* es mayor que el de ramas laterales, además de poseer una copa cónica y un menor valor de *fc* que indica capacidad de asimilación fotosintética y rendimiento inferiores (Hess *et al.* 2016).

La proporción de copa (*pc %*) en las plantaciones forestales está influenciada por la densidad, condiciones ambientales del sitio y prácticas silvícolas aplicadas previamente (Lang *et al.* 2010, McIntosh *et al.* 2012, Sanguetta *et al.* 2014, Cisneros *et al.* 2019). Así, se observa que esta variable morfométrica incrementa de forma consistente conforme aumentan las dimensiones del *dn* en ambas especies analizadas, en las mejores condiciones de crecimiento, lo cual es un reflejo directo de una capacidad fotosintética superior. Para *P. pseudostrobus*, el intervalo de altitud en donde mejor se desarrolla la especie se presenta entre los 2.750 a 2.950 m s.n.m., mientras que para *P. montezumae* las condiciones de las exposiciones oeste y suroeste son propicias para un mayor desarrollo de las dimensiones de copa.

El intervalo altitudinal de 2.750 a 2.950 m s.n.m. y las exposiciones oeste y suroeste, identificadas como las que propician las mejores condiciones de crecimiento y desarrollo para *P. pseudostrobus* y *P. montezumae*, respectivamente, pueden utilizarse como indicadores para el establecimiento de plantaciones forestales de ambas especies, lo cual para la región representa un área de mucho potencial para ampliar la superficie de estos cultivos forestales (Muñoz *et al.* 2015).

Los resultados de los diferentes *IM* son una muestra en el manejo forestal, o para el planteamiento de nuevas investigaciones que contribuyan a la implementación de herramientas silvícolas cuantitativas de aplicabilidad. Esta información contribuye a la comprensión de las interacciones de competencia en las plantaciones, lo que permitiría incrementar la productividad y rendimiento de las PF establecidas en Michoacán con estas dos especies del género *Pinus*.

CONCLUSIONES

Las diferencias entre los índices morfométricos (*IM*) y la relación proporcional del dosel en función del diámetro normal en las plantaciones forestales de *Pinus* de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), Michoacán, México, son definidas principalmente por la altitud en el caso de *P. pseudostrobus*, y por la exposición para *P. montezumae*. Los indicadores e *IM*

estimados, así como los modelos propuestos pueden servir como indicadores de la productividad en las plantaciones forestales, ser referencia para definir índices de competencia, indicadores en la aplicación de prácticas silvícolas acorde a la etapa de desarrollo, o herramientas para definir la densidad específica de estas plantaciones, ya que son parámetros indirectos que registran la velocidad de asimilación fotosintética en cada condición de crecimiento. Esta información puede ser incluida en la planeación de las actividades silvícolas dentro la gestión forestal en las plantaciones de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae* en la CINSJP, Michoacán, México.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo a capacitación y formación de personal investigador, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca doctoral (733.112) otorgada al primer autor, y a la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán por las facilidades y apoyo recibido en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Aguirre-Salado CA, JR Valdez-Lazalde, G Ángeles-Pérez, HM De los Santos-Posadas, A Aguirre-Salado. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos spot 5 hrg: regresión y k-nn. *Agrociencia* 45: 105-119.
- Álvarez TM, A Barrio, VJ Gorgoso, JG Álvarez. 2003. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección de *Pinus radiata* D. Don. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 12(2): 25-35.
- Arias AD. 2005. Morfometría del árbol en plantaciones forestales tropicales. *Kurú: Revista Forestal* 2(5): 1-13.
- Báez-Hernández A, G Herrera-Meza, M Vázquez-Torres, EN Aquino-Bolaños, AJ Martínez. 2016. Relaciones alométricas de 19 especies de árboles de la selva alta perennifolia. *Botanical Sciences* 94(2): 209-220. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.252>
- Castaño MA, HA Chica, BD Obando, NM Riaño. 2013. Arquitectura del dosel e interceptación de la radiación solar por tres especies forestales nativas en Colombia. *Cenicafé* 64 (1): 19-30.
- Cayuela L. 2018. Modelos lineales mixtos (LMM) y modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) en R. Madrid, España. Área de Biodiversidad y Conservación: Universidad Rey Juan Carlos. 69 p.
- Cisneros A, JG Moglia, JA Álvarez. 2019. Morfometría de copa en *Prosopis alba* Griseb. *Ciencia Florestal* 29(2): 863-884. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509826846>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal, MX). 2018. Programas específicos de intervención institucional: Programa de plantaciones forestales comerciales 2014-2018. Consultado 28 abr. 2021. Disponible en <https://www.gob.mx/conafor/documentos/plantaciones-forestales-comerciales-27940>

- Correa JC, JC Salazar. 2016. Introducción a los modelos mixtos. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 257 p.
- Costa EA, CAG Finger, FD Fleig. 2016. Influência da posição social nas relações morfométricas de *Araucaria angustifolia*. *Ciência Florestal* 26(1): 225-234. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509821116>
- Cunha TA, CAG Finger. 2013. Competição assimétrica e o incremento diamétrico de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Amazônia Ocidental. *Acta Amazonica* 43(1): 9-18. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000100002>
- Daniels RF, HE Burkhart, TR Clason. 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of Loblolly-Pine trees. *Canadian Journal of Forest Research* 16(6): 1230-1237. DOI: <https://doi.org/10.1139/x86-218>
- Galán FJ, J Feregrino, LA Ruiz, L Quintana, MA Mendoza, RA Rosales. 2016. Econometría aplicada utilizando R. Ciudad De México, México. Universidad Nacional Autónoma de México. 446 p.
- Hess AF, T Loiola, S Arruda, B Nascimento. 2016. Morfometría de la copa de *Araucaria angustifolia* en sitios naturales en el sur de Brasil. *Bosque* 37(3): 603-611. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002016000300017>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX). 2017. *Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017*. Aguascalientes, México. National Institute of Statistics and Geography. 726 p.
- Lang AC, W Härdtle, H Bruelheide, C Geibler, K Nadrowski, A Schuldt, M Yu, G Oheimb. 2010. Tree morphology responds to neighbourhood competition and slope in species-rich forests of subtropical China. *Forest Ecology and Management* 260: 1708-1715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.015>
- Li S, S Lyu, Y Zhang, Y Liu, Y Gao, Y Ao. 2015. The change of global terrestrial ecosystem net primary productivity (NPP) and its response to climate change in CMIP5. *Theoretical and Applied Climatology* 121: 319-335. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1242-8>
- Littell RC, GA Milliken, WW Stroup, DD Wolfinger, O Schabenberger. 2006. SAS for mixed models. 2 ed. Cary, North Carolina, USA. SAS Institute. 814 p.
- López GG, MCC Nieto. 2019. Características estructurales de un bosque de pino en Tlalnepantla, Morelos. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(51): 23-52. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.187>
- Martínez GMA, VA Sánchez, AEA Toledo, FJ Faulin. 2014. Bioestadística amigable. 3 ed. Barcelona, España. Elsevier. 596 p.
- McIntosh ACS, AN Gray, SL Garman. 2012. Estimating canopy cover from standard forest inventory Measurements in Western Oregon. *Forest Science* 58(2): 154-167. DOI: [10.5849/forsci.09-127](https://doi.org/10.5849/forsci.09-127)
- Muñoz FHJ, JT Sáenz, JJ García, VM Coria, Y Muñoz. 2015. Áreas potenciales para establecer plantaciones comerciales de pino en la sierra Purhépecha, Michoacán. *Foresta Veracruzana* 17(2): 35-42.
- Nájera-Luna JA, E Hernández-Hernández. 2008. Relaciones morfométricas de un bosque coetáneo de la región de el Salto, Durango. *Ra Ximhai* 4(1): 69-81.
- PNUD (Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo). 2012. Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro: México. New York, USA. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. 11 p.
- Rodríguez LR, S Valencia, J Meza, MA Capó, A Reynoso. 2008. Crecimiento y características de la copa de procedencias de *Pinus gregii* Engelm. en Galeana, Nuevo León. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(1): 19-26.
- Sanquetta CR, A Behling, AP Corte, AC Fernández, SM Beckert, AA Simon. 2014. Equações para estimativa do diâmetro de copa para Acácia-negra. *Floresta e Ambiente* 21(2): 192-205. DOI: <https://doi.org/10.4322/loram.2014.001>
- Schomaker M, S Zanoach, K Stolte. 1999. Tree crown condition indicator. USDA-Forest Service. Forest Health Monitoring Fact Sheet. Asheville, USA. 4 p.

Recibido: 01.01.22
Aceptado: 16.10.22