

Influencia de la competencia en el crecimiento diamétrico de *Pinus durangensis* Martínez en Durango, México

Influence of competition on the diametric growth of *Pinus durangensis* Martínez in Durango, Mexico

José Guadalupe Colín¹, Oscar Alberto Aguirre-Calderón^{1*}, José Javier Corral Rivas², Eleney Viveros-Guerrero¹, Sacramento Corral Rivas³, Felipe Crecente Campo⁴

Abstract:

In this paper the effect of competition on individual tree diameter growth of *Pinus durangensis* was analyzed. Trees were growing in mixed and uneven-aged stands in Durango, Mexico. The data used in the study were obtained from two forest inventories performed in 2009 and 2014 in 16 permanent sampling plots for forest and soil research (SPIFYS) of 2 500 m² in size. *Pinus durangensis* was the dominant species within the sites, covering 39.44 % of the importance value, and it is growing with other 18 tree species. 14 distance-independent and 11 distance-dependent competition indices were used to evaluate the effect of competition. 11 competitor selection methods were tested in combination with the selected distance-dependent indices. Distance-independent competition indices showed slightly better results than distance-dependent indices for predicting diameter at breast height growth for the studied tree species. The distance-independent competition index derived from the ratio between of the basal area of the reference tree and the basal area per hectare best described the effect of the competition, and therefore, it is recommended for its possible addition within further models to predict the breast height diameter growth for the tree species analyzed in this study.

Key words: Diameter growth, competitor selection method, exponential equation, linear equation, power equation, distance-independent and distance-dependent competition index.

Resumen:

En esta investigación se analizó la influencia de la competencia sobre el crecimiento en diámetro normal en árboles de *Pinus durangensis* en bosques mixtos e irregulares del estado de Durango. Se utilizaron datos de dos inventarios realizados en 2009 y 2014, en 16 Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos (SPIFYS) de 2 500 m², dentro de los cuales, *Pinus durangensis* fue la especie dominante del estrato arbóreo, con 39.44 % del valor de importancia, y crece de manera mezclada con otras 18 especies arbóreas. El efecto de la competencia fue analizado mediante 14 índices de competencia independientes de la distancia y 11 dependientes de la distancia; para ello, se evaluaron 11 criterios de selección de árboles competidores. Los índices independientes de la distancia explicaron ligeramente mejor que los índices dependientes de la distancia el crecimiento en diámetro normal de la especie estudiada. El índice de competencia independiente de la distancia que se deriva de la razón entre el área basal del árbol objetivo y el área basal por hectárea describió mejor el efecto deseado, por lo que se recomienda para su posible inclusión en futuros modelos de crecimiento en diámetro normal desarrollados para *P. durangensis*.

Palabras Clave: Crecimiento en diámetro, criterio de selección de competidores, ecuación exponencial, ecuación lineal, ecuación de potencia, índices de competencia dependiente e independiente de la distancia.

Fecha de recepción/Reception date: 31 de agosto de 2017

Fecha de aceptación/Acceptance date: 17 de noviembre de 2017.

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

²Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango. México.

³Instituto Tecnológico de El Salto. México.

⁴CERNA Ingeniería y Asesoría Medioambiental S.L.P. España.

*Autor por correspondencia, correo-e: oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx

Introducción

En ecología forestal, la competencia puede definirse como el efecto negativo que un árbol ejerce sobre otro, debido al consumo o al control que ejerce sobre el acceso a un determinado recurso (luz, agua o nutrimentos) de disponibilidad limitada (Burkhardt y Tomé, 2012). El efecto de este factor puede llevar hacia una reducción de la supervivencia, el crecimiento o la reproducción del individuo afectado, pues es una de las fuerzas fundamentales en la evolución y funcionamiento de los ecosistemas (Pretzsch, 2009).

La competencia ha sido estudiada mediante el uso de índices por un gran número de investigadores desde hace más de medio siglo (Clark y Evans, 1954; Arney, 1973; Alemdag, 1978; Lorimer, 1983; Tomé y Burkhardt, 1989; Biging y Dobbertin, 1995; Corral *et al.*, 2005). Estos son un indicador que estima la competencia total a la que está sometido un árbol y que se manifiesta en su crecimiento (Burkhardt y Tomé, 2012).

Munro (1974) clasifica a dichos índices en dos grupos: independientes de la distancia, los cuales no consideran la distribución espacial de los árboles y no requieren la obtención de las coordenadas de los mismos, e índices dependientes de la distancia, que sí incluyen la distribución espacial con respecto al individuo objetivo.

De acuerdo con Biging y Dobbertin (1995), Bachmann (1998) y Corral *et al.* (2005), el impacto de la competencia que ejerce uno o más individuos sobre el crecimiento de un árbol puede abordarse con resultados similares, mediante el uso de índices independientes o dependientes de la distancia, para estos últimos se utiliza un método adecuado para la selección de los árboles competidores de un árbol objetivo. El anterior es uno de los factores indispensables para la construcción de un modelo de crecimiento de árbol individual, especialmente, si se trata de especies en bosques mixtos e irregulares (Schröder y Gadow, 1999). Sin embargo, ese tipo de

estudios se han realizado, sobre todo, en plantaciones de una sola especie, por lo que los relativos a bosques irregulares con más de un taxon son todavía muy escasos (Moravie *et al.*, 1999; Coates *et al.*, 2009; Seydack *et al.*, 2011).

Así, se plantearon como objetivos: a) estimar la significancia del efecto de la competencia en el crecimiento en diámetro normal de árboles de *Pinus durangensis* Martínez en rodales mixtos e irregulares, ubicados en el estado de Durango; b) comparar la capacidad para describir la competencia de los índices independientes y dependientes de la distancia con diferentes criterios para la selección de competidores; y c) identificar el mejor índice de competencia o la mejor combinación de un índice de competencia con un criterio de selección de competidores para incorporarlo, en un futuro, a un modelo de crecimiento en diámetro normal para *P. durangensis*.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Los datos provienen de 16 Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos (SPIFyS) establecidos en el ejido La Ciudad, municipio Pueblo Nuevo, Durango, el cual se ubica dentro de la Unidad de Manejo Forestal Regional (UMAFOR) 1008, cuyas comunidades forestales más importantes están compuestas por bosques mezclados con especies de *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus*, *Arbutus* y *Alnus*; son rodales de segundo crecimiento que han estado sujetos al aprovechamiento forestal por más de 100 años (Luján *et al.*, 2015). El tamaño de las parcelas fue de 50 × 50 m (0.25 ha), y se ubicaron de manera sistemática dentro de los límites del ejido (Figura 1).

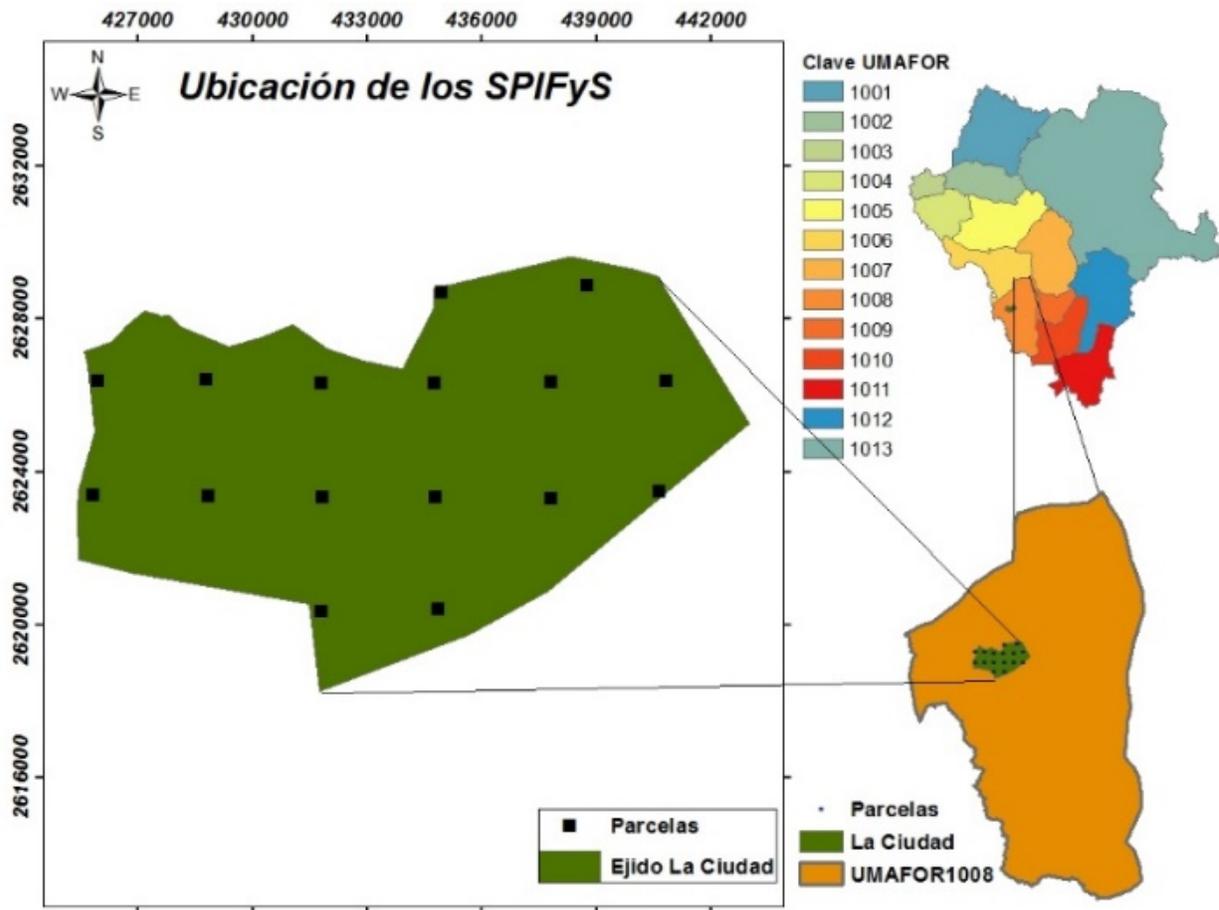


Figura 1. Ubicación de los Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos utilizados en el estudio.

Toma de datos

Los datos fueron colectados en dos fechas: la primera al momento de la instalación e inventario inicial de los SPIFYs en 2009, y la otra durante el segundo inventario realizado cinco años después, en 2014; en dicho periodo, los sitios no fueron intervenidos con ningún tipo tratamiento silvícola.

Dentro de cada sitio se obtuvieron por árbol con diámetro normal ≥ 7.5 cm, las siguientes variables: especie, dominancia, diámetro normal (d , cm) mediante una forcípula con graduación milimétrica *Haglöf Mantax Blue*, para ello se

siguieron las direcciones de los lados de la parcela; además se midieron: la altura total (h, m), altura de fuste limpio (m), distancia del árbol al centro del sitio (m), diámetro de copa (m), con un hipsómetro *Vertex IV* con graduación en centímetros; y el azimut del árbol con respecto al centro del sitio, con un instrumento *Suunto Tandem Global Compass/Clinometer*.

Pinus durangensis fue la especie dominante dentro del área de estudio, pues registra 39.44 % de valor de importancia (Campo y Duval, 2014), pero está mezclada con los siguientes taxa, que se ordenan de forma decreciente de acuerdo a su valor de importancia (valores dados entre los paréntesis): *Pinus cooperi* Blanco (11.51 %), *Quercus sideroxyla* Bonpl. (7.14 %), *Juniperus deppeana* Steud. (5.92 %), *Alnus firmifolia* Fernald (3.47 %), *P. strobiformis* Engelm. (3.42 %), *Q. crassifolia* Humb. et Bonpl. (3.23 %), *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. (3.03 %), *Q. rugosa* Neé (2.92 %), *Arbutus arizonica* (A. Gray) Sarg (2.64 %), *P. herrerae* Martínez (2.32 %) *A. madrensis* M. González (2.23 %), *A. bicolor* S. González, M. González et P. D. Sørensen (2.08 %), *P. teocote* Schltdl. & Cham. (1.96 %), *A. tessellata* P. D. Sørensen (1.80%), *A. xalapensis* Kunth (1.72 %), *Q. conzattii* Trel. (1.65 %), *Q. durifolia* Seemen (1.69 %) y *Populus tremuloides* Michx. (1.60 %). En el Cuadro 1 se presentan los estadísticos descriptivos de las variables dasométricas de los dos inventarios realizados hasta el momento en los SPIFyS.



Cuadro 1. Principales variables dasométricas de los Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos utilizados en este estudio.

Variable	Media ± SD (2009)	Media ± SD (2014)
N	666 ± 354	612 ± 326
G	23.09 ± 7.77	26.55 ± 8.58
Dg	23.78 ± 6.67	25.83 ± 6.57
V	224.11 ± 83.17	274.03 ± 103.79
H0	20.14 ± 3.9	21.69 ± 4.07

N = Número de árboles por ha; G = Área basal en m² por ha; Dg = Diámetro medio cuadrático en cm; V = Volumen por ha en m³; H0 = Altura dominante en m.

Índices de competencia analizados

En los cuadros 2 y 3 se presentan los índices de competencia analizados: 14 de ellos pertenecen al grupo de los independientes de la distancia ($IC_1 - IC_{14}$), y 11 a los dependientes de la distancia ($ICd_1 - ICd_{11}$) (Munro, 1974), que fueron seleccionados a partir de experiencias previas (Martínez y Madrigal, 1982; Pukkala y Kolström, 1987; Holmes y Reed, 1991; Biging y Dobbertin, 1992; Mäkinen, 1997; Schröder y Gadow, 1999; Álvarez *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2005; Crecente *et al.*, 2007).

Cuadro 2. Expresión matemática de los índices de competencia independientes de la distancia utilizados en este estudio.

Índice	Nombre del índice y fuente	Expresión matemática
IC_1	Número de árboles por hectárea (N)	$(n/100)/S$
IC_2	Área basal por hectárea (G)	$\pi/4 \sum_{i=1}^{i=n} d_i^2 10000 / S$
IC_3	Reineke (1933)	$10^{(\log N + 1.605 \log Dg - 1.605)}$
IC_4	Factor de Competencia de Copa	$\pi/4 \sum_{i=1}^{i=n} dc_i^2 100 / S$
IC_5	Índice de Hart (IH)	$100 / (H_0 \sqrt{N})$
IC_6	Krajicek <i>et al.</i> (1961) (CCF)	$\pi/4 \sum_{i=1}^{i=n} dcm_i^2 100 / S$
IC_7	Ritchie y Hann (1982) (CCFL)	$\pi/4 \sum dcm_{mayori}^2 100 / S$
IC_8	Wykoff <i>et al.</i> (1982) (Basal Area in Larger Trees (BAL))	$\pi/4 \sum d_{mayori}^2 10000 / S$
IC_9	Vanclay (1991) (BAL)	BAL / G
IC_{10}	Schröder y Gadow (1999) (BALMOD)	$(1 - [1 - (BAL / G)]) / IH$
IC_{11}	Razón diámetro-diámetro medio cuadrático	d_i / D_G
IC_{12}	Razón sección normal-área basal	g_i / G
IC_{13}	Razón área basimétrica-diámetro	$(g_i / G)^{d_i} / D_g$
IC_{14}	Razón diámetro de copa-diámetro	dc_i / d_i

n = Número de árboles por sitio; S = Superficie del sitio (m^2); d_i = Diámetro normal del árbol objetivo (cm); \log = Logaritmo de base 10; d_g = Diámetro cuadrático (cm); dc_i = Diámetro de copa, en proyección horizontal, del árbol objetivo (m); dcm_i = Diámetro de copa máximo (en crecimiento libre) del árbol objetivo (m) estimado con la ecuación (3); dcm_{mayor_i} = Diámetro de copa, en proyección horizontal de los árboles mayores que el árbol objetivo (m); d_{mayor_i} = Diámetro normal de los árboles mayores que el árbol objetivo (cm); g_i = Sección normal del árbol objetivo (m^2); G = Área basal ($m^2 ha^{-1}$); BAL = Índice BAL; IH = Índice de Hart.

Cuadro 3. Expresión matemática de los índices de competencia dependientes de la distancia utilizados en este estudio.

Índice	Nombre del índice y fuente	Expresión matemática
ICd_1	Staebler (1951)	$\sum_{i \neq j} L_{ij}$
ICd_2	Gerrard (1969)	$\sum_{i \neq j} \{O_{ij}/Z_i\}$
ICd_3	Bella (1971)	$\sum_{i \neq j} \{O_{ij} d_j / Z_{ij} d_i\}$
ICd_4	Hegyí (1974)	$\sum_{i \neq j} \{d_j / (Dist_{ij} d_i)\}$
ICd_5	Alemdag (1978)	$\sum_{i \neq j} \left\{ \pi \left[\frac{Dist_{ij} d_i}{d_i + d_j} \right]^2 \left(\frac{d_j}{Dist_{ij}} \right) / \sum \left(\frac{d_j}{Dist_{ij}} \right) \right\}$
ICd_6	Martin y Ek (1984)	$\sum_{i \neq j} \left\{ \left(\frac{d_j}{d_i} \right) \exp \left(\frac{16 Dist_{ij}}{d_i + d_j} \right) \right\}$

ICd_7	Daniels <i>et al.</i> (1986)	$d_i^2 nc / \sum_{i \neq j} d_j^2$
ICd_8	Braathe (1980)	$\sum_{i \neq j} \{h_i / (h_j Dist_{ij})\}$
ICd_9	Biging y Dobbertin (1992) (CCSp)	$\sum_{i \neq j} \{CC_j / (CC_i (Dist_{ij}^{+1}))\}$
ICd_{10}	Biging y Dobbertin (1992) (CVSp)	$\sum_{i \neq j} \{CV_j / (CV_i (Dist_{ij}^{+1}))\}$
ICd_{11}	Biging y Dobbertin (1992) (CVU)	$\sum_{i \neq j} \{CV_{\alpha j} / CV_j\}$

L_{ij} = Longitud (m) del segmento que une los centros del árbol objetivo y de su competidor, incluida en el área de traslape de sus zonas de influencia; O_{ij} = Área de solapamiento (m²) entre las zonas de influencia del árbol objetivo y del árbol competidor; Z_i = Área de la zona de influencia del árbol objetivo (m²); d_j = Diámetro normal del árbol competidor (cm); $Dist_{ij}$ = Distancia en proyección horizontal entre el árbol objetivo y el árbol competidor (m); nc = Número de árboles competidores; h_i = Altura total del árbol objetivo (m); h_j = Altura total del árbol competidor (m); CC_i = Superficie de copa en proyección horizontal del árbol objetivo (m²) a un cierto porcentaje p de su altura; CC_j = Superficie de copa en proyección horizontal del árbol competidor (m²) a un cierto porcentaje p de la altura del árbol objetivo; CV_i = Volumen de copa del árbol objetivo (m³ por encima de un cierto porcentaje p de su altura); CV_j = Volumen de copa del árbol competidor (m³) por encima de un cierto porcentaje p de la altura del árbol objetivo; $CV_{\alpha j}$ = Volumen de copa del árbol competidor j por encima del punto α .

Criterio de selección de competidores

Se analizaron 11 criterios de selección de los árboles competidores de *Pinus durangensis* (códigos C_1 a C_{11}). Con el criterio C_1 se eligieron como árboles competidores de esta especie todos los individuos incluidos en una parcela móvil de *Bitterlich* con centro en el árbol objetivo, y con un factor de área basal (BAF) igual a $4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Según ese criterio, para que un árbol sea competidor del individuo objetivo, la distancia entre ellos no puede ser superior a 25 veces su propio diámetro normal (Crecente *et al.*, 2007).

En el criterio C_2 los árboles competidores fueron todos los seleccionados con el criterio C_1 , además del árbol más cercano que se localice dentro de cada uno de los cuadrantes definidos por los cuatro puntos cardinales (Crecente *et al.*, 2007). Con el criterio C_3 se seleccionaron los cuatro individuos arbóreos más cercanos al árbol objetivo (Crecente *et al.*, 2007). El criterio C_4 , propuesto por Biging y Dobbertin (1992), se basó en considerar competidores activos aquellos árboles cuya altura total (h_j) supera una línea imaginaria trazada desde la base del árbol objetivo, con una inclinación de 60° con respecto a la horizontal (Figura 2). Esta línea marca un punto (en su intersección con el eje del árbol competidor) a partir del que se tomó el volumen de la copa, para calcular el índice de competencia ICd_{11} . La relación entre distancia y altura que determinó, si un árbol se eligió como competidor activo fue:

$$\tan 60^\circ = \frac{h_j}{Dist_{ij}} = 1.73 \Rightarrow Dist_{ij} \leq \frac{h_j}{1.73} \quad (1)$$

Donde:

h_j = Altura total de árbol competidor (m)

$Dist_{ij}$ = Distancia del árbol objetivo al árbol competidor (m)

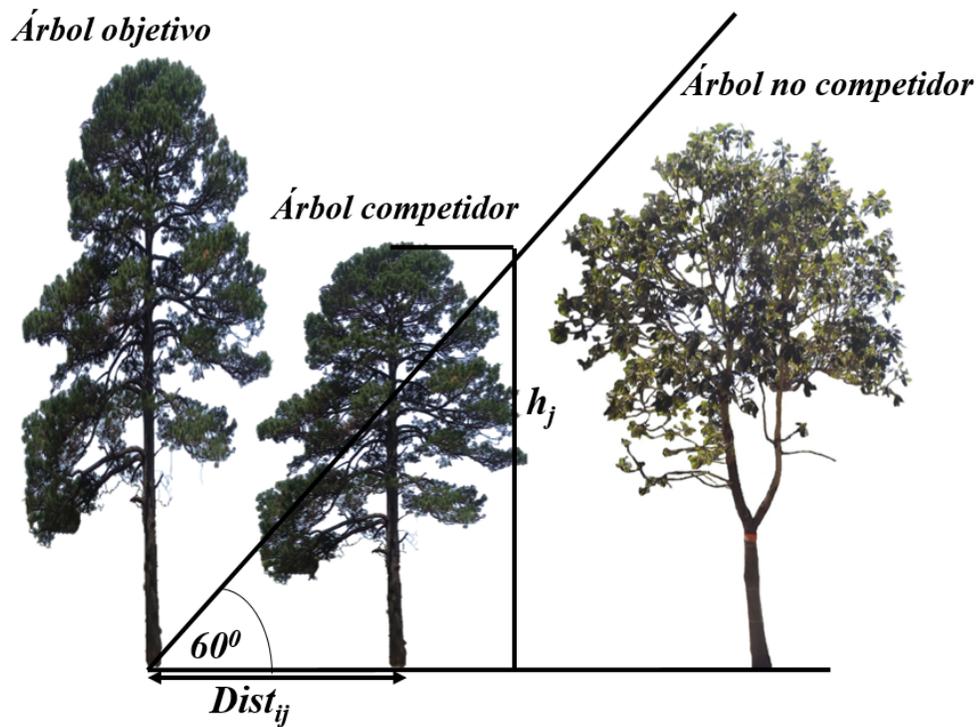


Figura 2. Ilustración del criterio de selección de competidores C_4 .

El criterio C_5 se diferencia del anterior en que la recta inclinada tiene su origen en la base de la copa del árbol objetivo (Figura 3). La relación entre distancia y altura que determina si un árbol se selecciona como competidor activo fue:

$$\tan 60^\circ = \frac{h_j - HBC_i}{Dist_{ij}} = 1.73 \Rightarrow Dist_{ij} \leq \frac{h_j - HBC_i}{1.73} \quad (2)$$

Donde:

h_j = Altura total del árbol competidor (m)

$Dist_{ij}$ = Distancia del árbol objetivo con el árbol competidor (m)

HBC_i = Altura a la base de la copa del árbol objetivo (m)

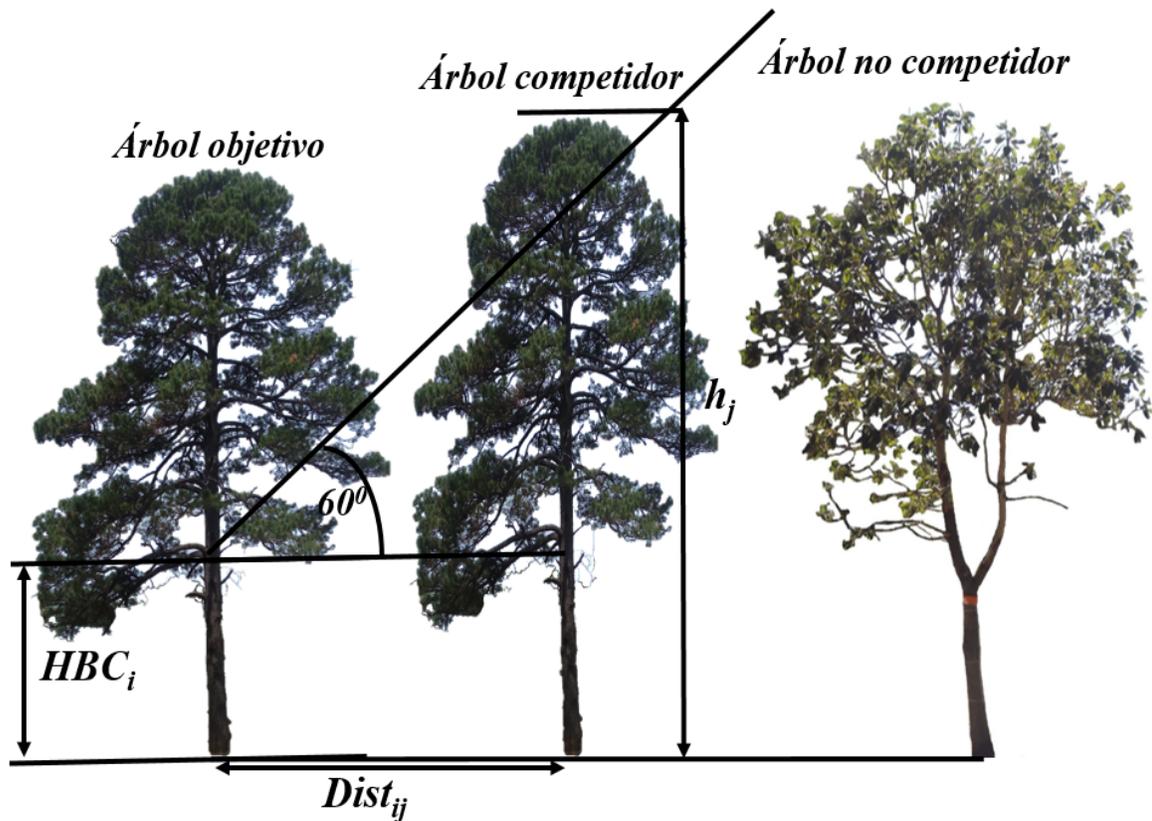


Figura 3. Ilustración del criterio de selección de competidores C_5 .

El criterio C_6 se basó en el concepto de la zona de influencia (Staebler, 1951). Para este caso fueron competidores activos todos los árboles cuya zona de influencia se traslapó con la del árbol objetivo (Figura 4). Se tomó como radio el valor máximo que podría alcanzar dicha dimensión de la copa del árbol, si estuviese creciendo libre de competencia, el cual fue estimado mediante la ecuación propuesta por Cruz y Castañeda (1999):

$$mcw_i = 0.1503d_i + 2.0241 \quad (3)$$

Donde:

mcw_i = Máximo crecimiento de copa (m)

d_i = Diámetro normal (cm) del árbol seleccionado

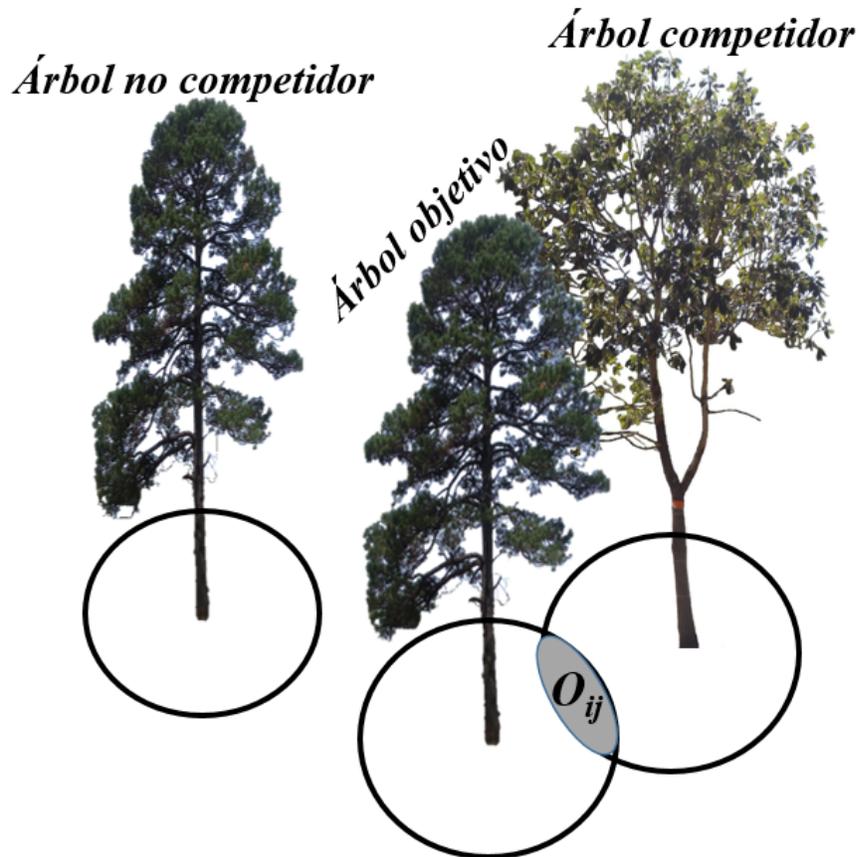


Figura 4. Ilustración del criterio de selección de competidores C_6 .

El criterio C_6 es el único que se puede emplear con los índices de competencia basados en la zona de influencia (ICd_1 , ICd_2 e ICd_3).

Los criterios C_7 a C_{11} incluyen el concepto de ángulo de eliminación de competencia (Lee y Gadow, 1997), según el cual se selecciona como primer competidor activo el árbol más cercano al árbol objetivo; a continuación, se delimita un sector circular con un ángulo determinado, cuya bisectriz es la línea que los une. Todos los árboles incluidos en dicho círculo que se sitúan detrás del primer competidor, se descartan como posibles

competidores activos. El proceso continúa con la elección del siguiente individuo más cercano al árbol objetivo y situado fuera del primer sector circular, patrón que se repite hasta identificar a todos los competidores activos (Figura 5), con un ángulo de eliminación de 60° (C_9). El número de competidores activos disminuye a medida que aumenta el ángulo de eliminación de competencia. En otras investigaciones han utilizado ángulos de 90° , 75° , 60° , 45° y 30° , que definen los criterios C_7 a C_{11} , respectivamente (Corral *et al.*, 2005; Crecente *et al.*, 2007).

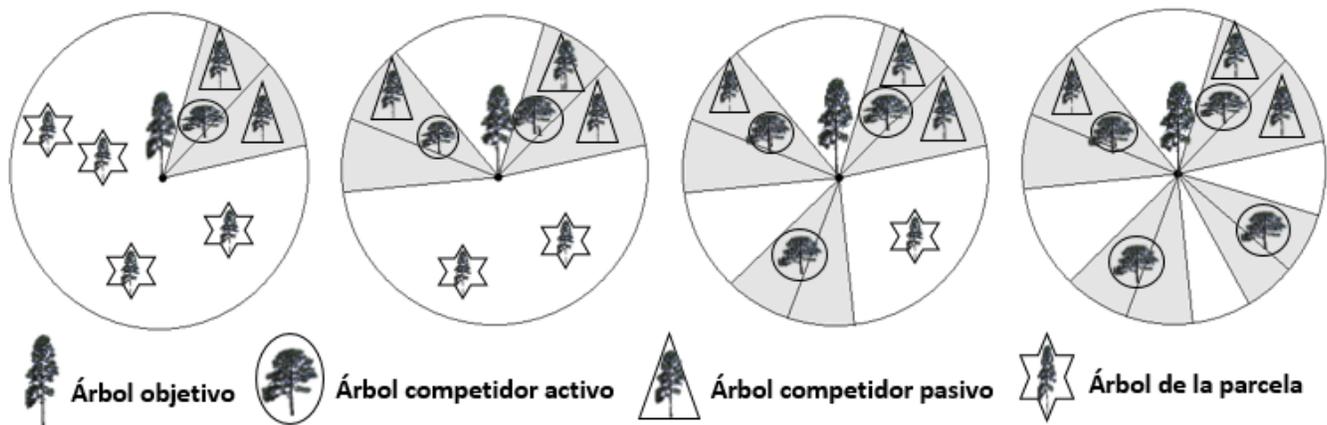


Figura 5. Ilustración del procedimiento para seleccionar árboles competidores activos de un árbol de referencia, con base en un ángulo de eliminación de 60° (criterio C_9).

Modelos analizados

Se utilizaron tres modelos: uno de tipo lineal simple, uno exponencial y otro potencial (ecuaciones 4 a 6) para analizar la influencia que ejerce la competencia en el crecimiento en diámetro normal de los árboles de *Pinus durangensis* dentro de los sitios estudiados. Los modelos se probaron para todas las combinaciones posibles entre los índices y los criterios de selección de competidores:

$$\Delta\gamma = \alpha + \beta \cdot C_i \quad (4)$$

$$\Delta\gamma = \alpha \cdot e(\beta \cdot C_i) \quad (5)$$

$$\Delta\gamma = \alpha \cdot C_i^\beta \quad (6)$$

Donde:

$\Delta\gamma$ = Variable por modelar (crecimiento en diámetro normal durante un periodo de 5 años)

C_i = Índice de competencia independiente de la distancia o la combinación de un índice de competencia dependiente de la distancia con un criterio de selección de competidores

α y β = Parámetros por estimar en el ajuste de los modelos

La estimación de los parámetros del modelo lineal se realizó por mínimos cuadrados, mediante el procedimiento REG del programa SAS/STAT® (SAS, 2004). En el caso de los modelos no lineales se utilizó el procedimiento NLIN implementado en el mismo programa.

La bondad de ajuste (*i.e.* significancia del efecto de la competencia en el crecimiento en diámetro normal) se evaluó mediante la significancia de los ajustes de los modelos y con los estadísticos coeficiente de determinación (R^2) y raíz del error medio cuadrático (REMC). Para los modelos exponencial y potencial, el coeficiente de determinación estimado correspondió al propuesto por Ryan (1997) para regresión no lineal, el cual es equivalente al cuadrado del coeficiente de correlación de los valores observados y los valores estimados por los modelos.

Resultados y Discusión

En el Cuadro 4 se listan los 10 índices de competencia o combinaciones de índice de competencia con un criterio de selección de competidores que mostraron los mayores niveles de explicación de la variabilidad observada en el crecimiento en diámetro normal de árboles de *Pinus durangensis*; la variable predictiva fue la competencia en los tres tipos de modelos estudiados. Estos índices son, también, los que arrojaron los menores errores medios, y en todos los casos el ajuste resultó ser muy significativo ($p < 0.0001$), lo que hace suponer que el uso de la competencia como variable predictiva contribuye de forma importante a la explicación del crecimiento en diámetro normal de la especie estudiada.

Cuadro 4. Índices de competencia con los mejores estadísticos de ajuste de modelos de crecimiento en diámetro de tipo lineal, exponencial y potencial.

Lineal				Exponencial				Potencial			
Cr	IC	R ²	REMC	Cr	IC	R ²	REMC	Cr	IC	R ²	REMC
	IC ₆	0.33	0.76	C11	ICd ₄	0.29	0.78		IC ₁₂	0.35	0.74
	IC ₈	0.28	0.79	C10	ICd ₄	0.28	0.78	C11	ICd ₄	0.28	0.78
	IC ₁₀	0.27	0.79	C2	ICd ₄	0.28	0.78	C10	ICd ₄	0.28	0.78
	IC ₁₁	0.26	0.79	C9	ICd ₄	0.27	0.79		IC ₁₁	0.27	0.79
	IC ₁₂	0.25	0.80		IC ₁₀	0.26	0.79	C3	ICd ₄	0.27	0.79
	IC ₉	0.23	0.81	C8	ICd ₄	0.26	0.79	C9	ICd ₄	0.27	0.79
C11	ICd ₅	0.22	0.82	C7	ICd ₄	0.25	0.80	C3	ICd ₅	0.26	0.79
C7	ICd ₅	0.21	0.82	C3	ICd ₄	0.25	0.80	C2	ICd ₄	0.26	0.79
C3	ICd ₅	0.20	0.82		IC ₁₁	0.22	0.81	C7	ICd ₄	0.25	0.80
C10	ICd ₅	0.20	0.83		IC ₉	0.22	0.82	C8	ICd ₄	0.25	0.80

Cr = Criterio de selección de competidores; IC = Índice de competencia; R² = Coeficiente de determinación; REMC = Raíz del error medio cuadrático.

Los mejores valores de los estadísticos de ajuste R^2 y REMC se obtuvieron con los índices independientes de la distancia y el uso de los modelos potencial y lineal. El índice IC_{12} (que se basa en el cálculo del radio del área basal del árbol objetivo y el área basal por ha) fue el que presentó el mejor ajuste, mediante el uso del modelo potencial, y explica 35 % de la variabilidad observada en el crecimiento en diámetro de *P. durangensis*, con un valor de REMC de 0.74 cm; seguido del IC_6 que representa el factor de competencia de copas (CCF), definido como el porcentaje del área de crecimiento ocupada por la proyección de las copas, y asume que cada árbol crece libremente (sin competencia), lo que explica 33 % de la variabilidad observada en el crecimiento en diámetro, durante el período de observación con el modelo lineal, y una REMC de 0.76 cm.

Los índices independientes de la distancia IC_8 e IC_{10} también mostraron buenos resultados en la explicación de la varianza observada en el crecimiento en diámetro. Los resultados de este trabajo son consistentes con los de Crecente *et al.* (2007) en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia, España, donde los índices independientes de la distancia presentaron valores ligeramente mejores que los dependientes de la distancia, en el estudio del efecto de la competencia crecimiento en diámetro y altura de la especie referida.

Valles y Valadez (2006) obtuvieron también, mejores ajustes con el uso de un índice de competencia independiente de la distancia basado en la amplitud de la copa, ponderada por la densidad en bosques mezclados en San Dimas, Durango. De igual forma, Tíscar y Tíscar (2010) determinaron en una población de *Pinus nigra* Arnold de la Sierra de Cazorla (sureste de España), un índice independiente de la distancia que incluye la variable área de copa como el más adecuado para ser incluido en modelos para la predicción de crecimiento en diámetro normal. Sin embargo, los valores de R^2 de este trabajo son inferiores a los de Álvarez *et al.* (2004), quienes calcularon cifras de 0.66 para los índices independientes de la distancia BAL y BALMOD, en un modelo exponencial ajustado para datos de crecimiento en la sección de árboles individuales de *Pinus radiata* en El Bierzo (León, España).

Otros investigadores, como Álvarez *et al.* (2003), Biging y Dobbertin (1995), Corral *et al.* (2005) y Schröder y Gadow (1999) registraron que los índices independientes de la distancia basados

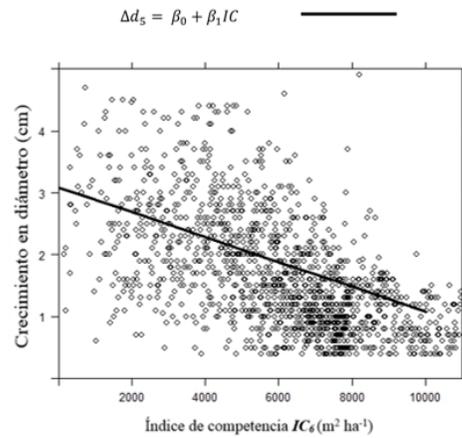
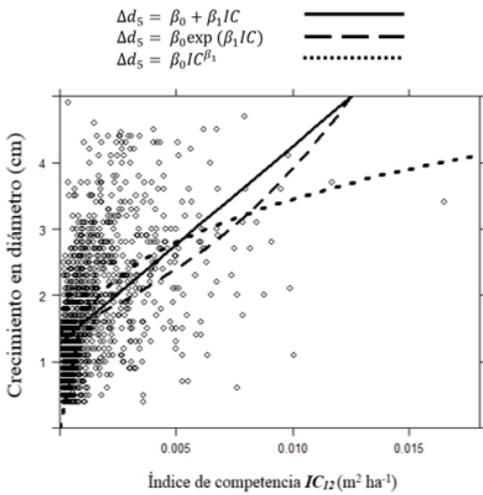
en el uso del área basal (BAL y BALMOD) producían mejoras significativas en las estimaciones de modelos de crecimiento en diámetro de especies presentes en rodales coetáneos.

Por otra parte, los índices basados en la densidad del rodal (número de árboles por hectárea, área basal por hectárea, *Reineke*, factor de competencia de copa, e índice de *Hart*) resultaron poco adecuados para evaluar el efecto de la competencia, ya que no explicaron ni 15 % de la variación de los datos de crecimiento, por lo que no se aconseja su empleo como índices de competencia. Dichos resultados concuerdan con estudios anteriores realizados en *Quercus robur* L. (Maseda, 1998) y en *Pinus radiata* (Álvarez, 1998; Álvarez *et al.*, 2003).

Dentro del grupo de índices de competencia dependientes de la distancia, el índice ICd_4 combinado con los criterios C_{10} y C_{11} , fue el que mejores resultados proporcionó mediante el modelo exponencial, al explicar 29 % de la variabilidad observada en el crecimiento en diámetro, con valores de REMC de 0.78 cm. Esos criterios de selección de competidores (C_{10} y C_{11}) usan ángulos de eliminación de competencia de 45 y 30°, respectivamente, y son sencillos de aplicar ya que limitan el número de competidores, por lo que podrían utilizarse para el trabajo de campo (Álvarez *et al.*, 2003).

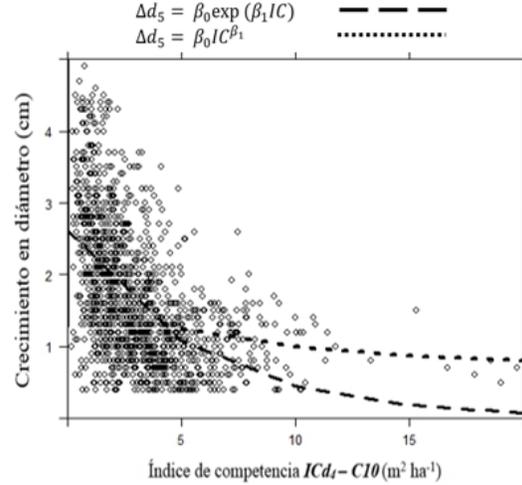
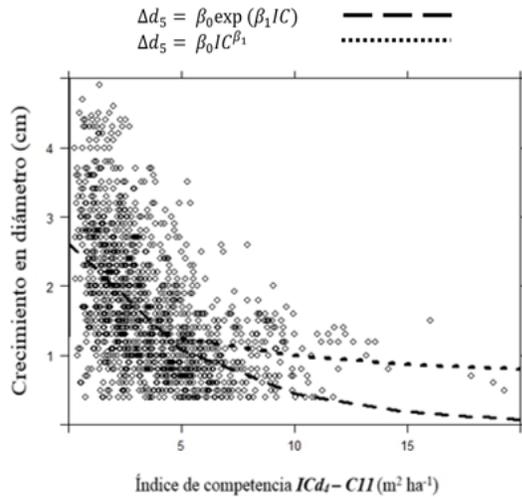
En segundo lugar, se situó el índice ICd_5 al combinarse con el criterio C_3 . Estos índices están fuertemente relacionados entre sí, ya que se basan en razones de tamaños (diámetro normal) ponderados por las distancias, y consideran que la competencia que sobre un árbol ejercen los individuos que le rodean, aumenta cuando se incrementa su tamaño y se reduce la distancia que los separa (Crecente *et al.*, 2007).

En la Figura 6 se muestra la relación entre los índices de competencia independientes de la distancia IC_6 e IC_{12} y el índice de competencia dependiente de la distancia ICd_4 con los criterios C_{11} y C_{10} , y el crecimiento individual en diámetro para *Pinus durangensis* con los modelos lineal, exponencial y potencial, o solo el que mejor ajustó. En la mayoría de los casos, el modelo potencial describe mejor la tendencia de los datos al utilizar a los índices de competencia como variable predictiva, situación que se explica porque se obtienen valores menores de error medio cuadrático en comparación con las ecuaciones lineal y exponencial.



Relación entre el crecimiento individual en diámetro y el índice de competencia IC_{12} con los modelos lineal, exponencial y potencial.

Relación entre el crecimiento individual en diámetro y el índice de competencia IC_6 con el modelo lineal.



Relación entre el crecimiento individual en diámetro y el índice de competencia ICd_4 y el criterio C_{11} , con los modelos exponencial y potencial.

Relación entre el crecimiento individual en diámetro y el índice de competencia ICd_4 y el criterio C_{10} , con los modelos exponencial y potencial.

Modelo lineal = Línea continua; Modelo exponencial = Línea de puntos; Modelo potencial = Línea discontinua, superpuestos a la nube de puntos.

Figura 6. Índices de competencia que mejores resultados proporcionaron para los modelos de crecimiento en diámetro.

Por lo general, el valor de los distintos criterios de selección de competidores para un mismo índice no presenta grandes diferencias, aunque siempre hay uno que resulta ligeramente más favorable, los otros poseen un valor bastante aproximado a este.

Si bien los resultados sugieren que los mejores índices de competencia independientes de la distancia IC_6 e IC_{12} , explican entre 33 y 35 % de la varianza observada en crecimiento del diámetro, es evidente que al momento de desarrollar el modelo de crecimiento faltaría incluir como variables predictivas a otras, como el diámetro normal inicial, la calidad de estación y otros factores que influyen de manera significativa en el incremento de la sección normal de los árboles (López *et al.*, 2013; Quiñonez *et al.*, 2015).

Conclusiones

El ajuste de la mayoría de los modelos probados resultó ser significativo, lo que indica que el uso de la competencia como variable predictiva contribuye vigorosamente en la explicación del crecimiento del diámetro normal de *Pinus durangensis*. Los índices independientes de la distancia resultan ser mejores variables predictivas que los dependientes de la distancia para evaluar la influencia de la competencia sobre la especie de interés, que crece en masas mixtas e irregulares en el estado de Durango. El índice IC_{12} , derivado de la razón entre el área basal del árbol objetivo y el área basal por hectárea, describió mejor el efecto de la competencia; por lo tanto, se recomienda para su inclusión en futuros modelos de crecimiento en diámetro normal para *P. durangensis*. Su implementación dentro del modelo representa una tarea sencilla, ya que durante los inventarios con fines de manejo forestal que se realizan en el área de estudio cada 10 años, se registran las variables necesarias para el cálculo de este índice.

Agradecimientos

Se agradece al Conacyt por el apoyo financiero otorgado al primero autor para estudiar en el programa de Doctorado en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

José Guadalupe Colín: trabajo de campo y elaboración del manuscrito; Oscar Alberto Aguirre Calderón: revisión del manuscrito y coordinación de las revisiones; José Javier Corral Rivas: revisión del manuscrito y análisis estadístico; Eleney Viveros Guerrero: trabajo de campo y elaboración del manuscrito; Sacramento Corral Rivas: revisión del manuscrito; Felipe Crecente Campo: revisión del manuscrito y análisis estadístico.

Referencias

Alemdag, I. S. 1978. Evaluation of some competition indices for the prediction of diameter increment in planted White spruce. Canadian Forestry Service, Department of the Environment. Forest Management Institute Information Report FMR-X-108. Ottawa, Ontario, Canada. 39 p.

Álvarez T., M. F. 1998. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. Proyecto fin de carrera. EPS. Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, Galicia, España. pp. 1-45.

- Álvarez T., M. F., M. Barrio, J. Gorgoso y J. G. Álvarez. 2003. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales 12(2): 25–35.
- Álvarez T., M. F., R. A. Marqués G., M. Fernández y F. Castedo V. 2004. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección de *Pinus radiata* D. Don en el Bierzo (León). Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 18: 129-133.
- Arney, J. D. 1973. Tables for quantifying competitive tress on individual trees on individual trees. Canadian Forestry Service. Information Report BCX-78. Victoria, British Columbia, Canada. 45 p.
- Bachmann, M. 1998. Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen. Methodische Untersuchung in Bergmischwäldern. Forstliche Forschungsberichte München Nr. 171. München, Bayern, Deutschland. 171 p.
- Bella, I. E. 1971. A new competition model for individual trees. Forest Science 17(1): 364–372.
- Biging, G. S. and M. Dobbertin. 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer tress. Forest Science 38(3): 695–720.
- Biging, G. S. and M. Dobbertin. 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. Forest Science 41(2): 360–377.
- Braathe, P. 1980. Height increment of young single trees in relation to height and distance of neighbouring trees. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt 130: 43–47.
- Burkhart, H. E. and M. Tomé. 2012. Modeling Forest Trees and Stands. Springer. Dordrecht, Netherlands. 458 p.

- Campo, A. M. y V. S. Duval. 2014. Diversidad y valor de importancia para la conservación de la vegetación natural. Parque Nacional Lihué Calel (Argentina). *Anales de Geografía* 34(2): 25-42.
- Clark, P. J. and F. C. Evans. 1954. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in population. *Ecology* 35: 445-453.
- Coates, K. D., C. D. Canham and P. T. LePage. 2009. Above- versus below-ground competitive effects and responses of a guild of temperate tree species. *Journal of Ecology* 97: 118-130.
- Corral R., J. J., J. G. Álvarez, O. Aguirre and F. J. Hernández. 2005. The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of *Pinus cooperi* Blanco in Durango (Mexico). *European Journal of Forest Research* 124: 133-142.
- Crecente C., F., E. Vázquez-Gómez, R. Rodríguez-Soalleiro y U. Diéguez-Aranda. 2007. Influencia de la competencia en el crecimiento individual de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 23: 167-174.
- Cruz, C. F. y A. J. Castañeda. 1999. Guía de densidad para *Pinus cooperi* var. *blanco* del "Ejido La Victoria" Pueblo Nuevo Durango. *In: X Congreso de la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria*. 24 al 26 de noviembre. Oaxaca, Oax., México. 5 p.
- Daniels, R. F., H. E. Burkhart and T. R. Clason. 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research* 16(6): 1230-1237.
- Gerrard, D. I. 1969. Competition quotient: a new measure for the competition affecting individual forest trees. Michigan State University. Agriculture Research Station. Research Bulletin 20. Lansing, MI, USA. 32 p.

Hegyí, F. 1974. A simulation model for managing jack pine stands. *In*: Fries, J. (ed.). Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forestry, Department of Forest Yield Research. Research Note Num. 30. Stockholm, Sweden. pp. 74–90.

Holmes, M. J. and D. D. Reed. 1991. Competition indices for mixed species northern hardwoods. *Forest Science* 37(5): 1338–1349.

Krajicek, J. E., K. A. Brinkman and S. F. Gingrich. 1961. Crown competition: a measure of density. *Forest Science* 7(1): 35–42.

Lee, D. T. and K. von Gadow. 1997. Iterative Bestimmung der Konkurrenzbaume in *Pinus densiflora* Beständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 168(3-4): 41–44.

López, L., R. Villalba and F. Bravo. 2013. Cumulative diameter growth and biological rotation age for seven tree species in the Cerrado biogeographical province of Bolivia. *Forest Ecology and Management* 292: 49-55.

Lorimer, C. G. 1983. Test of age-independent competition indices for individual tree in natural hardwood stands. *Forest Ecology and Management* 6(4): 343–360.

Luján S., J. E., J. J. Corral R., O. A. Aguirre C. and K. von Gadow. 2015. Grouping forest tree species on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 186(3-4): 63–71.

Mäkinen, H. 1997. Possibilities of competition indices to describe competitive differences between Scots pine families. *Silva Fennica* 31(1): 43–52.

Martin, G. L. and A. R. Ek. 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. *Forest Science* 30(3):731–733.

- Martínez M., F. J. y A. Madrigal. 1982. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección. Comunicaciones INIA, Serie Recursos Naturales Núm. 13. Madrid, España. 88 p.
- Maseda V., P. 1998. Influencia de la competencia sobre el crecimiento en sección en *Quercus robur*. Proyecto fin de carrera. EPS. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo, España. 42 p.
- Moravie M. A., M. Durand and F. Houllier. 1999. Ecological meaning and predictive ability of social status, vigour and competition in a tropical rain forest (India). *Forest Ecology and Management* 117(3): 221–240.
- Munro, D. D. 1974. Forest growth models: a prognosis. *In: Fries, J. (ed.). Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forestry, Department of Forest Yield Research. Research Note Num. 30. Stockholm, Sweden. pp. 7-21.*
- Pretzsch, H. 2009. *Forest dynamics, growth and yield, from measurement to model.* Springer. Heidelberg, Berlin. 664 p.
- Pukkala, T. and T. Kolström. 1987. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fennica* 21(1): 55–67.
- Quiñonez B., G., H. M. De los Santos P. y J. G. Álvarez-González. 2015. Crecimiento en diámetro normal para *Pinus* en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6 (29): 108-125
- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand density index for even-aged forest. *Journal of Forest Research* 46: 627–638.
- Ritchie, M. W. and D. W. Hann. 1982. Equations for predicting basal area increment in Douglas-fir and grand fir. Forest Research Laboratory, School of Forestry, Oregon State University. Research Bulletin Num. 51. Corvallis, OR, USA. 9 p.

- Ryan, T. P. 1997. Modern regression methods. John Wiley & Sons. New York, NY, USA. pp. 285-332.
- Statistical Analysis System (SAS) 2004. User's Guide. SAS/STAT® 9.1. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. n/p.
- Schröder, J. and K. von Gadow. 1999. Testing a new competition index for maritime pine in northwestern Spain. Canadian Journal of Forest Research 29(2): 280–283.
- Seydack A., H. W., G. Durrheim and J. H. Louw. 2011. Spatiotemporally interactive growth dynamics in selected South African forests: Edaphoclimatic environment, crowding and climate effects. Forest Ecology and Management 261(7): 1152–1169.
- Staebler, G. R. 1951. Growth and spacing in an even-aged stand of Douglas-fir. Master of Forestry. University of Michigan. Ann Arbor, MI, USA. 100 p.
- Tíscar, P. A. y M. A. Tíscar. 2010. Influencia del tamaño y la competencia sobre el crecimiento en sección de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* y su relación con la selvicultura próxima a la naturaleza. Spanish Journal of Rural Development 1(3): 39–50.
- Tomé, J. M. and H. E. Burkhart. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. Forest Science 35(3): 816–831.
- Vanclay, J. K. 1991. Mortality functions for north Queensland rainforest. Journal of Tropical Forest Science 4(1): 15–36.
- Valles G., A. G. y R. C. Valadez C. 2006. Evaluación de índices de competencia independientes de la distancia para predecir el crecimiento de bosques mezclados en San Dimas, Durango. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 12(1): 39–44.

Wykoff, W. R., N. L. Crookston and A. R. Stage. 1982. User's guide to the stand prognosis model. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report INT-133. Odgen, UT, USA. 112 p.



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