



DOI: [10.29298/rmcf.v12i68.898](https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.898)

Artículo

## Estimación del crecimiento de dos especies de *Pinus* de la Región Centro de Guerrero, México

### Growth estimation of two pine species from the Central Region of Guerrero state México

Francisco Javier Hernández<sup>1\*</sup>, Brenda Mireya Bretado Medrano<sup>2</sup>, Ezequiel Márquez Bernal<sup>2</sup>, Juan Abel Nájera Luna<sup>1</sup>, Benedicto Vargas Larreta<sup>1</sup>

#### Abstract

The application of growth models for individual trees in mixed forests allows estimates to be made at the management unit level. The objective of the present study was to evaluate the growth models in normal diameter, basimetric area, total height and stem volume of Chapman-Richards, Schumacher, Hossfeld I and Weibull for individual *Pinus pseudostrobus* and *Pinus oocarpa* trees from the state of Guerrero, Mexico. Through selective sampling, 27 dominant and 28 codominant trees were collected to reconstruct the profiles of trees arranged in groups of ten years, by means of the stem analysis technique. The selection of the best models for each variable was made based on the adjusted coefficient of determination, the root mean square error, the properties of the parameters and the logical growth trends. The results indicate that the Schumacher model was the best to estimate growth in normal diameter and height in both species, the basal area of *Pinus pseudostrobus* and the volume of *Pinus oocarpa*, while the Chapman-Richards model was the best for estimate the basal area for *Pinus oocarpa* and the volume for *Pinus pseudostrobus*. The estimated turn ages for volume in *Pinus oocarpa* were 62 years and for *Pinus pseudostrobus*, 82 years.

**Key words:** Total height, basimetric area, diameter growth, growth models, *Pinus*, stem volume.

#### Resumen

La aplicación de modelos de crecimiento para árboles individuales en bosques mezclados permite realizar estimaciones a nivel de la unidad de manejo. El objetivo del presente estudio fue evaluar los modelos de crecimiento en diámetro normal, área basal, altura total y volumen fustal de Chapman-Richards, Schumacher, Hossfeld I y Weibull para árboles individuales de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus oocarpa* de Guerrero, México. Mediante muestreo selectivo se recolectaron 27 árboles dominantes y 28 codominantes para reconstruir los perfiles de árboles ordenados en grupos de diez años, por medio de la técnica de análisis troncales. La selección de los mejores modelos para cada variable se realizó con base en el coeficiente de determinación ajustado, la raíz del error medio cuadrático, las propiedades de los parámetros y las tendencias lógicas de crecimiento. Los resultados indican que el modelo de Schumacher fue el mejor para estimar el crecimiento en diámetro normal y la altura en ambas especies, así como el área basal de *Pinus pseudostrobus* y el volumen de *Pinus oocarpa*; mientras que, el modelo de Chapman-Richards fue el mejor para estimar el área basal de *Pinus oocarpa* y el volumen para *Pinus pseudostrobus*. Las edades estimadas del turno para volumen en *Pinus oocarpa* fueron de 62 años y para *Pinus pseudostrobus* de 82 años.

**Palabras clave:** Altura total, área basal, crecimiento en diámetro, modelos de crecimiento, *Pinus*, volumen fustal.

Fecha de recepción/Reception date: 8 de octubre de 2020

Fecha de Aceptación/Acceptance date: 18 de agosto de 2021

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de El Salto. División de Estudios de Posgrado e Investigación. México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de El Salto. Ingeniería Forestal. México.

\*Autor para correspondencia: correo-e: fcojhernan@yahoo.com.mx

## Introducción

El volumen maderable por aprovechar está en función del crecimiento y rendimiento de las especies que conforman los rodales forestales. En este contexto, es una práctica común la predicción del diámetro normal, el área basal, de la altura total o del volumen en función de variables predictoras tales como edad, densidad, calidad de estación, índices de competencia u otras que explican de manera alométrica o biológica el crecimiento de los árboles (Briseño *et al.*, 2020).

Desde hace varias décadas se han generado diversos modelos que simulan de forma lógica y precisa el crecimiento a nivel individual o de rodal a través del tiempo (Clutter *et al.*, 1983; Corral y Návar, 2005; McCullagh *et al.*, 2017); los modelos de *Chapman-Richards*, *Schumacher*, *Weibull* y *Hosffeld I*, en particular, tienen la propiedad de simular el crecimiento sigmoideal de las especies forestales maderables y reflejar la dinámica antagónica que ocurre entre los factores fisiológicos intrínsecos que estimulan el crecimiento y los del medio ambiente que lo limitan (Kiviste *et al.*, 2002). Desde el punto de vista práctico, las ecuaciones que resultan del ajuste de los parámetros de esos modelos sirven para estimar el crecimiento de los árboles, cuyo conocimiento es fundamental en la toma de decisiones silvícolas eficientes que aseguran un aprovechamiento maderable sustentable (Santiago-García *et al.*, 2013; Vargas-Larreta *et al.*, 2013).

La modelación y predicción del crecimiento de rodales en bosques mezclados e irregulares es una tarea difícil, ya que estos bosques, además de reunir una variedad de especies, son irregulares en su estructura. En ellos, cada especie tiene diferente ritmo de crecimiento biológico como respuesta a la herencia genética y la adaptación a las condiciones ambientales donde se desarrolla (Diéguez *et al.*, 2009; Fien *et al.*, 2019). Con base en lo anterior, los modelos de crecimiento para árboles individuales facilitan la predicción al nivel de unidad de área, ya que la suma de los crecimientos de los árboles individuales que componen una unidad de superficie da como resultado el crecimiento total (Torres y Magaña, 2001). La técnica utilizada

para obtener información y el de modelo por utilizar depende del tipo de bosque: puro, mezclado, coetáneo, incoetáneo, homogéneo o heterogéneo; y del intervalo de proyección (Diéguez *et al.*, 2009; Hernández *et al.*, 2018; Briseño *et al.*, 2020).

*Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus oocarpa* Schiede ex Schlttdl. se distribuyen ampliamente en todo el territorio forestal de la región centro del estado de Guerrero; forman manchones de una sola especie o de varias del género *Pinus* asociadas con encinos y algunas latifoliadas, además se consideran dentro de los seis taxones del género de mayor importancia comercial. Presentan buenas características para utilizarse en la fabricación de triplay, chapa, cajas de empaque, molduras, construcción y fabricación de muebles (Conafor, 2015).

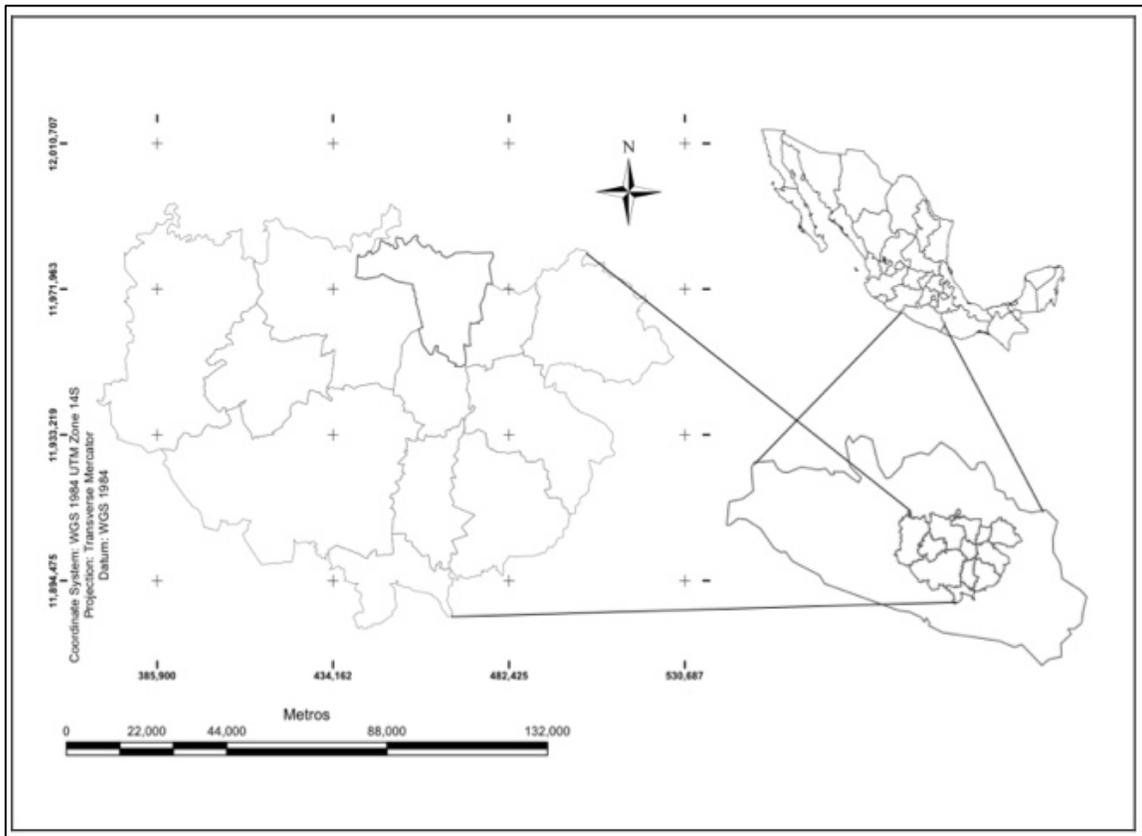
Con el propósito de generar herramientas que ayuden a la toma de decisiones para contribuir a lograr un aprovechamiento sustentable de las especies maderables de la región centro del estado de Guerrero, el objetivo del presente estudio fue evaluar la bondad de ajuste de cuatro modelos de crecimiento en diámetro normal, área basal, altura total y volumen fustal de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus oocarpa*, para seleccionar el más eficiente.



## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El área de estudio fue la Unidad de Manejo Forestal 1205 (Umafor-1205), la cual se ubica dentro del sistema montañoso Sierra Madre del Sur en la región centro del estado de Guerrero (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio.

Los tipos de clima en las áreas forestales de coníferas varían de templado a semicálido con diferentes graduaciones de humedad. Sin embargo, el clima predominante es (A)C(w) (García, 2004).

Los suelos se clasifican como leptosoles, luvisoles, regosoles y cambisoles; de ellos, los leptosoles tienen la mayor distribución dentro del área de estudio (Inegi, 2016).

## Muestreo

El método de muestreo selectivo se aplicó en las calidades de estación baja, media y alta de la Umafor-1205 para recolectar 27 árboles dominantes y 28 codominantes, sin daños físicos, con edades de 20 a 100 años. Del fuste de cada individuo se obtuvieron rodajas a 0.30 m, 0.60 m y 1.30 m de altura y posteriormente a cada 2.60 m hasta llegar a la parte de la punta para reconstruir 102 y 152 perfiles de árboles de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus oocarpa*, respectivamente; y se aplicó la metodología descrita por Klepac (1983) para realizar los análisis troncales.

## Variables

Las mediciones iniciales por árbol de cada especie fueron el diámetro normal con corteza obtenido a 1.30 m de altura con cinta diamétrica marca *Lufking*<sup>TM</sup> modelo 283D/5M, diámetro sin corteza de cada rodaja medido con regla *Lufking*<sup>TM</sup> y estimado como el promedio de dos medidas en cruz. Los anillos de cada rodaja se dividieron en grupos de 10 para medir el crecimiento radial a las diferentes alturas. La edad de cada uno de los árboles reconstruidos se determinó sobre el diámetro mayor de la rodaja obtenida a los 30 cm de altura del fuste. Para medir el diámetro normal y estimar el área basal de cada árbol reconstruido, los anillos de crecimiento se agruparon en edades de 10 años a partir del centro hacia la periferia (Klepac, 1983). La estimación de la altura verdadera se realizó mediante la fórmula de Carmean (1972) modificada por Newberry (1991), cuya expresión es:

$$H_{ij} = h_i + \frac{(h_{i+1} - h_i)}{[2(r_i - r_{i+1} - 0.5)]} + (j - 1) \frac{(h_{i+1} - h_i)}{(r_i - r_{i+1} - 0.5)}$$



Donde:

$H_{ij}$  = Altura total estimada en la rodaja  $i$  –ésima, correspondiente a  $j$  anillos de crecimiento

$h_i$  = Altura acumulada al corte superior de cada  $i$  –ésima rodaja

$h_{i+1}$  = Altura acumulada al corte superior de la siguiente  $i$  –ésima rodaja

$r_i$  = Número de anillos de crecimiento de la  $i$  –ésima rodaja

$r_{i+1}$  = Número de anillos de crecimiento de la siguiente  $i$  –ésima rodaja

$j$  = Número de anillos de crecimiento a partir del centro de cada rodaja

El área basal se determinó con la ecuación:

$$AB = \frac{\pi}{4} dn^2$$

Donde:

$AB$  = Área basal

$\pi$  = 3.14159

$dn$  = Diámetro normal medido a 1.30 de altura a partir de la superficie del suelo

Los volúmenes de cada troza se estimaron con la ecuación de *Smalian* y la del cono, respectivamente.

$$Vi = \frac{\pi}{4} \frac{(D_M^2 + D_m^2)}{2} l$$

$$Vp = \frac{\left(\frac{\pi}{4} D_b^2\right) l}{3}$$

Donde:

$D_M$  = Diámetro mayor de cada troza

$D_m$  = Diámetro menor de cada troza

$D_b$  = Diámetro de la base de la punta (m)

$l$  = Longitud de la troza (m)

La suma de los volúmenes de las trozas de cada árbol fue igual al volumen total sin corteza del fuste.

En el Cuadro 1 se muestran las estadísticas descriptivas básicas de las variables analizadas por especie.

**Cuadro 1.** Estadísticas descriptivas de las variables analizadas.

Especie	Variable	N	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación estándar
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	Diámetro (cm)	102	1.3	19.84	41.5	10.65
	Área basal (m <sup>2</sup> )	102	0.00013	0.03976	0.13526	0.03584
	Altura (m)	282	0.17	12.26	38.28	8.84
	Volumen (m <sup>3</sup> )	102	0.00042	0.45	2.32	0.5075
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.	Diámetro (cm)	152	1.3	20.23	45.5	10.0061
	Área basal (m <sup>2</sup> )	152	0.00013	0.03999	0.16259	0.03305
	Altura (m)	257	0.17	10.05	28.3	6.90207
	Volumen (m <sup>3</sup> )	152	0.00022	0.37325	1.84337	0.35941



## Análisis

A los datos de crecimiento en diámetro normal, área basal, altura y volumen se les ajustaron los modelos de crecimiento de *Chapman-Richards* (M1), *Hossfeld I* (M2), *Weibull* (M3) y *Schumacher I* (M4) citados por Kiviste *et al.*, (2002) mediante regresión no lineal (Cuadro 2). Además, se generaron sus respectivas expresiones para determinar el incremento corriente anual (*ICA*) y el incremento medio anual (*IMA*). Los ajustes se realizaron al aplicar el procedimiento *PROC MODEL* del programa estadístico SAS (SAS, 2002). El criterio analítico para seleccionar la bondad del ajuste de los modelos consideró a la raíz del error medio cuadrático (*REMC*), el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) y las propiedades estadísticas de los parámetros estimados.

$$R^2_{adj} = 1 - \left[ \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \right]$$

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}$$

Donde:

$y_i, \hat{y}_i, \bar{y}_i$  = Valor observado y valor predicho  $i$  de cada variable, así como el promedio estimado de la variable observada

$n$  = Número de observaciones

$p$  = Número de parámetros del modelo



**Cuadro 2.** Modelos de crecimiento evaluados y sus expresiones del *ICA* e *IMA*.

Modelo	Expresión	ICA	IMA
<i>Chapman-Richards</i>	$y = \beta_0(1 - \exp^{-b_1 E})^{b_2} + \varepsilon$	$ICA = \beta_0 b_1 \beta_2 (1 - \exp^{-b_1 E})^{b_2 - 1} \exp^{-b_1 E}$	$IMA = \frac{y}{E}$
<i>Hossfeld I</i>	$y = \frac{t^2}{(\beta_0 + b_1 E)^2} + \varepsilon$	$ICA = \frac{2\beta_0 E}{(\beta_0 + b_1 E)^3}$	$IMA = \frac{y}{E}$
<i>Weibull</i>	$y = \beta_0 (1 - \exp^{-\beta_1 E^{\beta_2}}) + \varepsilon$	$ICA = \beta_0 \beta_1 \beta_2 E^{\beta_2 - 1} \exp^{-\beta_1 E^{\beta_2}}$	$IMA = \frac{y}{E}$
<i>Schumacher</i>	$y = \beta_0 \exp^{-b_1 (\frac{1}{E})} + \varepsilon$	$ICA = \frac{\beta_0 b_1}{E^2} \exp^{-\frac{b_1}{E}}$	$IMA = \frac{y}{E}$

$y$  = Crecimiento en diámetro normal (cm), área basal (m<sup>2</sup>), altura total (m) y volumen fustal sin corteza (m<sup>3</sup>);  $E$  = Edad (años);  $\beta_1$   $\beta_2$  y  $\beta_2$  = Parámetros del modelo; *ICA* = Incremento corriente anual en diámetro normal (cm), área basal (m<sup>2</sup>), altura total (m) y volumen fustal (m<sup>3</sup>); *IMA* = Incremento medio anual en diámetro normal (cm), área basal (m<sup>2</sup>), altura total (m) y volumen fustal (m<sup>3</sup>).

Finalmente, como factor determinante para seleccionar el mejor modelo se consideró el análisis gráfico de las curvas de crecimiento.

Dado que las mediciones del crecimiento a través del tiempo de cada variable evaluada dentro de cada árbol están correlacionadas, se evaluó la significancia de la autocorrelación de los modelos seleccionados como los mejores mediante la prueba de *Durbin-Watson* (DW) (Sharma *et al.*, 2011; Quiñonez *et al.*, 2018).

$$d = \frac{\sum(e_t - e_{t-1})^2}{\sum e_t^2}$$

Donde:

$e_t$  = Residual  $t$  de cada observación

$e_{t-1}$  = Residual de cada observación anterior al residual  $e_t$

Cuando esta prueba fue significativa, se aplicó el modelo autorregresivo CAR(X) (Zimmerman *et al.*, 2001) para corregir el problema de autocorrelación y generar parámetros y errores estándar consistentes con los modelos. La estructura del modelo autorregresivo es:

$$e_{ij} = \sum_{k=1}^{k=x} I_k \rho_k^{h_{ij} - h_{ij-k}} e_{ij-k} + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$e_{ij}$  =  $j$  – ésimo residual ordinario en la observación  $i$

$I_k$  = 1 para  $j > k$  y 0 para  $j = k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, x$ )

$\rho_k$  = Parámetro autorregresivo de orden  $k$

$h_{ij} - h_{ij-k}$  = distancias de separación de las observaciones  $j$  – ésima a la  $j - k$  ésima

$\varepsilon_{ij}$  = Error independiente que sigue una distribución normal con media cero y varianza constante

Una vez seleccionado el mejor modelo, se estimó el *ICA* máximo ( $ICA_{m\acute{a}x}$ ) e *IMA* máximo ( $IMA_{m\acute{a}x}$ ) para cada una de las variables y especies. Ambos incrementos corresponden a los valores más altos calculados con las ecuaciones del *ICA* e *IMA*.



## Resultados

La estimación de los parámetros de los modelos sin considerar la estructura autorregresiva del error para *Pinus pseudostrobus* presentó valores de *DW* para el crecimiento en diámetro entre 0.9518 y 1.0028, área basal de 0.6188 a 0.9390, altura de 0.3057 a 0.3324 y volumen de 0.9896 a 1.0343; mientras que para *Pinus oocarpa*, los valores de *DW* para el crecimiento en diámetro variaron de 0.5095 a 0.5912, área basal de 0.5814 a 0.6621, altura de 0.3437 a 0.3655 y volumen de 0.6211 a 0.6966; cifras que indican autocorrelación. Los valores de *DW* estimados después de ajustar los modelos de crecimiento con el modelo autorregresivo CAR(1), CAR(2) y CAR(3) permitieron deducir que la autocorrelación de los residuales mejoró significativamente (Cuadro 3). A su vez, los estimadores de los parámetros  $\rho_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) fueron significativos para los modelos de crecimiento en diámetro, altura y volumen en ambas especies ( $Pr > 0.0001$ ), de lo que se infiere que la estimación de los parámetros y de los errores estándar son consistentes en esos modelos de crecimiento, más no para los de área basal ( $Pr > 0.05$ ) (cuadros 4 y 5). La independencia de los errores favorece la estimación de parámetros eficientes e insesgados y previene la subestimación de la matriz de covarianzas de los parámetros (González *et al.*, 2016).



**Cuadro 3.** Estadísticos de ajuste de los modelos de crecimiento en las variables analizadas.

Modelo	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.			<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.		
	$R^2_{adj}$	RCME	DW	$R^2_{adj}$	RCME	DW
Diámetro normal						
M1	0.7403	5.427	1.653	0.8654	3.671	1.162
M2	0.7230	5.605	1.746	0.9001	3.162	1.649
M3	0.7831	4.960	1.480	0.8640	3.690	1.182
M4	0.7400	5.431	1.654	0.8648	3.679	1.117
Área basal						
M1	0.7063	0.0194	1.489	0.9154	0.0096	1.590
M2	0.6962	0.0197	1.591	0.9096	0.0096	1.660
M3	0.7019	0.0196	1.514	0.9120	0.0097	1.509
M4	0.7105	0.0193	1.500	0.9079	0.0100	1.515
Altura						
M1	0.9650	1.6093	1.661	0.9460	1.603	1.220
M2	0.9338	2.2315	1.770	0.9441	1.631	1.300
M3	0.9645	1.6224	1.692	0.9688	1.231	1.597
M4	0.9275	2.3167	1.652	0.9695	1.204	1.598
Volumen						
M1	0.8544	0.1977	1.735	0.9321	0.0936	1.635
M2	0.7426	0.2574	1.626	0.9240	0.0990	1.621
M3	0.9338	0.0924	1.361	0.9338	0.0924	1.361
M4	0.8500	0.1964	1.737	0.9305	0.0947	1.608

M1 = *Chapman-Richards*; M2 = *Hossfeld I*; M3 = *Weibull*; M4 = *Schumacher*;  
 $R^2_{adj}$  = Coeficiente de determinación ajustado; RCME = Raíz cuadrada media del error; DW = *Durbin-Watson*.



**Cuadro 4.** Estimadores de los parámetros y errores estándar de los modelos evaluados para *Pinus pseudostrobus* Lindl.

<i>Pinus pseudostrobus</i>		Parámetros					
Modelo	Estadístico	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
Diámetro							
M1	Estimador	32.96137	0.07249	3.197013	1.00368		
	E. E.	2.86740	0.01540	0.83570	0.01100		
M2	Estimador	2.81260	0.12419		0.99036		
	E. E.	0.33320	0.00931		0.01450		
M3	Estimador	30.8810	0.00095	2.09730	1.01299	0.97076	0.32513
	E. E.	2.58110	0.00063	0.2283	0.00954	0.01740	0.21780
M4	Estimador	49.14015	24.38972		0.99762		
	E. E.	4.18750	2.49430		0.01210		
Área Basal							
M1	Estimador	0.08711	0.06955	4.85097	1.72976		
	E. E.	0.01440	0.02710	2.73200	8.73230		
M2	Estimador	92.12886	1.84175		0.09097		
	E. E.	15.33660	0.34970		0.45990		
M3	Estimador	0.081866	0.000242	2.37926	0.878077		
	E. E.	0.0111	0.000388	0.51580	4.26000		
M4	Estimador	0.16539	40.21302		3.05171		
	E. E.	0.0267	5.8208		15.43200		
Altura							
M1	Estimador	26.26966	0.06274	1.77583	1.146894	0.97393	
	E. E.	1.01290	0.00689	0.16550	0.01310	0.01190	
M2	Estimador	2.221376	0.15547		1.03211		
	E. E.	0.11780	0.00404		0.01310		
M3	Estimador	25.82468	0.01108	1.43804	1.14903	0.97225	
	E. E.	0.95930	0.00222	0.07600	0.01310	0.0119	
M4	Estimador	33.64891	16.64891		1.00452		
	E. E.	1.17250	0.83290		0.01420		
Volumen							
M1	Estimador	2.20766	0.02989	4.80571	4.203409		

	E. E.	1.54900	0.0185	2.27560	0.4316		
M2	Estimador	-46.1913	-0.14897		1.95681		
	E. E.	8.03150	0.14610		0.42170		
M3	Estimador	0.81488	$8.30 \times 10^{-8}$	4.12430	10.62855	3.36962	
	E. E.	0.06390	$1.15 \times 10^{-7}$	0.36980	1.33610	0.34480	
M4	Estimador	3.66476	82.53542		4.06032	2.38687	
	E. E.	0.90860	11.30020		0.39320	0.27590	

M1 = *Chapman-Richards*; M2 = *Hossfeld I*; M3 = *Weibull*; M4 = *Schumacher*;  
 E.E. = Error estándar;  $\beta_k$  = Parámetros del modelo;  $\rho_k$  = Parámetros del modelo  
 autorregresivo CAR(x).

**Cuadro 5.** Estimadores de los parámetros y errores estándar de los modelos  
 evaluados para *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.

<i>Pinus oocarpa</i>		Parámetros					
Modelo	Estadístico	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
Diámetro							
M1	Estimador	33.30371	0.05272	2.78622	0.97376		
	E. E.	1.91760	0.00869	0.54060	0.01280		
M2	Estimador	3.53210	0.12302		0.98023	0.97631	0.93747
	E. E.	0.25640	0.00556		0.01490	0.01180	0.01910
M3	Estimador	32.19344	0.00184	1.77252	0.97084		
	E. E.	1.71310	0.00092	0.16090	0.01300		
M4	Estimador	48.59111	30.57237		0.97336		
	E. E.	2.46550	2.04540		0.01310		
Área Basal							
M1	Estimador	0.11168	0.03658	3.81223	182509.8	1700.225	0.03670
	E. E.	0.01520	0.00706	0.72260	642673.0	4436.2	0.12610
M2	Estimador	134.7345	1.65843		$1.8093 \times 10^8$	101.28700	$3.93 \times 10^{-10}$
	E. E.	14.3358	0.23650		$5.1302 \times 10^8$	278.70000	$2.79 \times 10^{-9}$

M3	Estimador	0.08803	0.00010	2.36525	1.1768x10 <sup>8</sup>	13.08743	
	E. E.	0.00915	0.00008	0.23610	3.07x10 <sup>8</sup>	34.40770	
M4	Estimador	48.59111	30.57237		0.97336		
	E. E.	2.46550	2.04540		0.01310		
<b>Altura</b>							
M1	Estimador	19.2500	0.01592	1.34003	1.05532	0.97638	0.90647
	E. E.	0.54760	0.00334	0.07240	0.02130	0.01850	0.02060
M2	Estimador	2.17484	0.18839		0.96258		
	E. E.	0.10580	0.00343		0.01970		
M3	Estimador	19.25000	0.01592	1.34003	1.05532	0.97638	0.90647
	E. E.	0.54760	0.00334	0.07240	0.02130	0.01850	0.02060
M4	Estimador	23.34795	14.04075		1.06527	0.99418	0.93053
	E. E.	0.66200	0.69910		0.01990	0.01670	0.01650
<b>Volumen</b>							
M1	Estimador	0.90389	0.05058	6.86763	6.84513	4.00005	1.26232
	E. E.	0.10200	0.00685	1.33010	1.32240	0.64170	0.33180
M2	Estimador	-55.2519	-0.39983		10.48295	2.96807	0.33751
	E. E.	6.34390	0.09880		1.63760	0.46260	0.16290
M3	Estimador	0.81488	8.3x10 <sup>-8</sup>	4.12430	10.62855	3.36962	0.33751
	E. E.	0.06390	1.15x10 <sup>-7</sup>	0.36980	1.33610	0.34480	0.16290
M4	Estimador	2.33633	80.82759		7.09319	4.19346	1.35311
	E. E.	0.30240	6.66230		1.35920	0.67930	0.36270

M1 = *Chapman-Richards*; M2 = *Hossfeld I*; M3 = *Weibull*; M4 = *Schumacher*;  
*E.E.* = Error estándar;  $\beta_k$  = Parámetros del modelo;  $\rho_k$  = Parámetros del modelo  
 autorregresivo CAR(x).



## Bondad de ajuste de los modelos

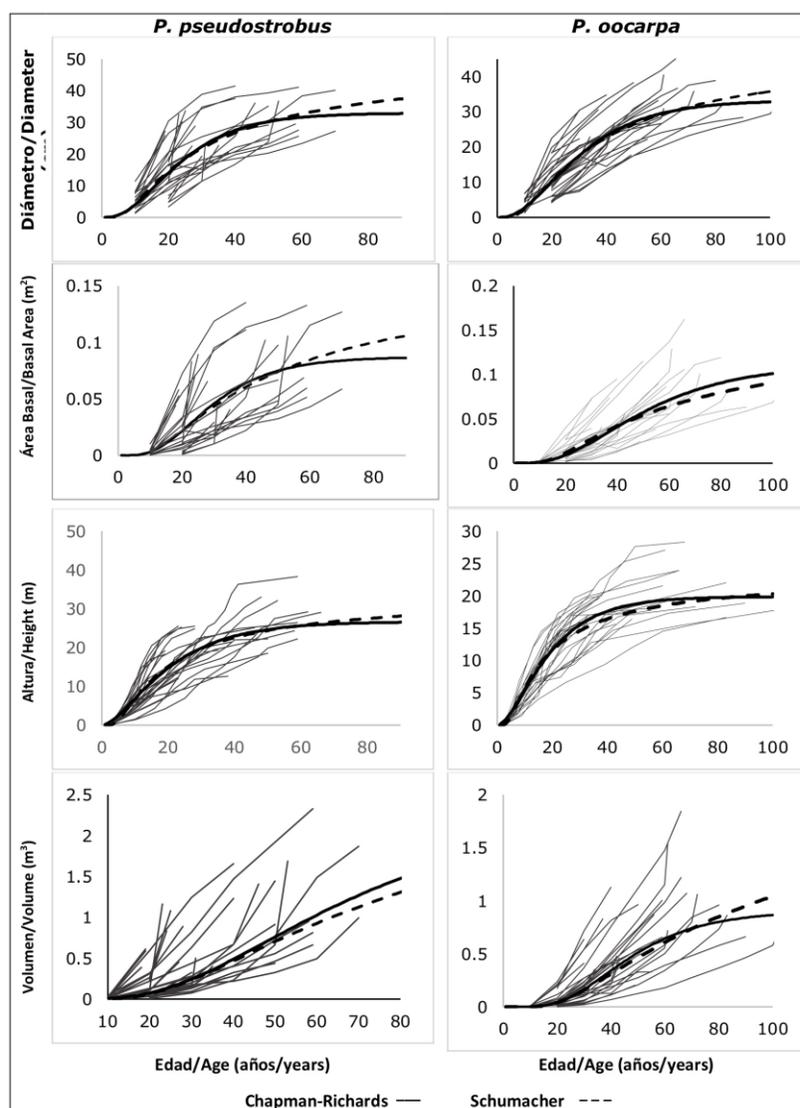
Los estadísticos  $R^2_{adj}$  y  $RCME$  indicaron que en *Pinus pseudostrobus*, el modelo de *Weibull* fue el que mejor se ajustó para estimar el crecimiento en diámetro y volumen y los de *Chapman-Richard* y *Weibull* en altura; a su vez, todos los modelos se ajustaron de manera similar en la estimación del área basal. En *Pinus oocarpa*, el modelo de *Hossfeld* I fue el que registró el mejor ajuste en diámetro, los de *Chapman-Richard* y *Weibull* en área basal, los de *Schumacher* y *Weibull* en altura, así como los de *Chapman-Richard*, *Weibull* y *Schumacher* en volumen (Cuadro 3).

Sin embargo, al considerar el nivel de significancia de los estimadores de los parámetros ( $\alpha < 0.05$ ), se desestimó el modelo de *Weibull* para predecir el crecimiento en diámetro, área basal, altura y volumen en *Pinus pseudostrobus*, y del crecimiento en área basal y volumen para *Pinus oocarpa*. De manera similar, los modelos de crecimiento en volumen de *Chapman-Richards* y *Hossfeld* I mostraron parámetros no significativos en *Pinus pseudostrobus*. Para esta especie, solo el modelo de *Schumacher* registró estimadores de los parámetros significativos en las cuatro variables de crecimiento estudiadas. En relación con *Pinus oocarpa*, todos los estimadores de los modelos de *Chapman-Richard*, *Hossfeld* I y *Schumacher* fueron significativos ( $Pr < 0.0001$ ) en las cuatro variables estudiadas. Con base en el contexto anterior, la valoración gráfica en la estimación del crecimiento de cada variable por especie, realizada con los modelos cuyos parámetros fueron todos significativos permitió definir al mejor modelo.

## Tendencias de las curvas de crecimiento

En la Figura 2 se observa que tanto el modelo de *Chapman-Richards* como el de *Schumacher* predicen crecimientos en diámetro normal muy similares para ambas especies hasta los 50 y 65 años. A partir de esas edades, la tasa de crecimiento predicha con el modelo de *Chapman-Richards* tiende a cero; mientras que con el modelo de *Schumacher*, el crecimiento continúa en sentido ascendente hasta

alcanzar la asíntota. Los máximos crecimientos en diámetro estimados con el modelo de *Chapman-Richards* en *Pinus pseudostrobus* y *Pinus oocarpa* fueron menores a los predichos con el modelo de *Schumacher*; este último presentó tasas de crecimiento más plausibles en edades superiores a los 60 años y se le seleccionó para realizar las predicciones del crecimiento en diámetro de ambas especies.



**Figura 2.** Comparativo de las tendencias de las curvas de crecimiento que generan los modelos de *Schumacher* y *Chapman-Richards* con respecto a las series de crecimiento observadas para las variables analizadas.

En relación al área basal, el modelo de *Schumacher* fue el que mejor reflejó la tendencia en *Pinus pseudostrobus*; el de *Chapman-Richards* lo hizo en *Pinus oocarpa* durante el periodo evaluado. En la primera especie, el modelo de *Schumacher* predijo crecimientos menores en el área basal hasta una edad aproximada de 70 años; en *Pinus oocarpa*, esto mismo sucede sobre todo el periodo de crecimiento evaluado.

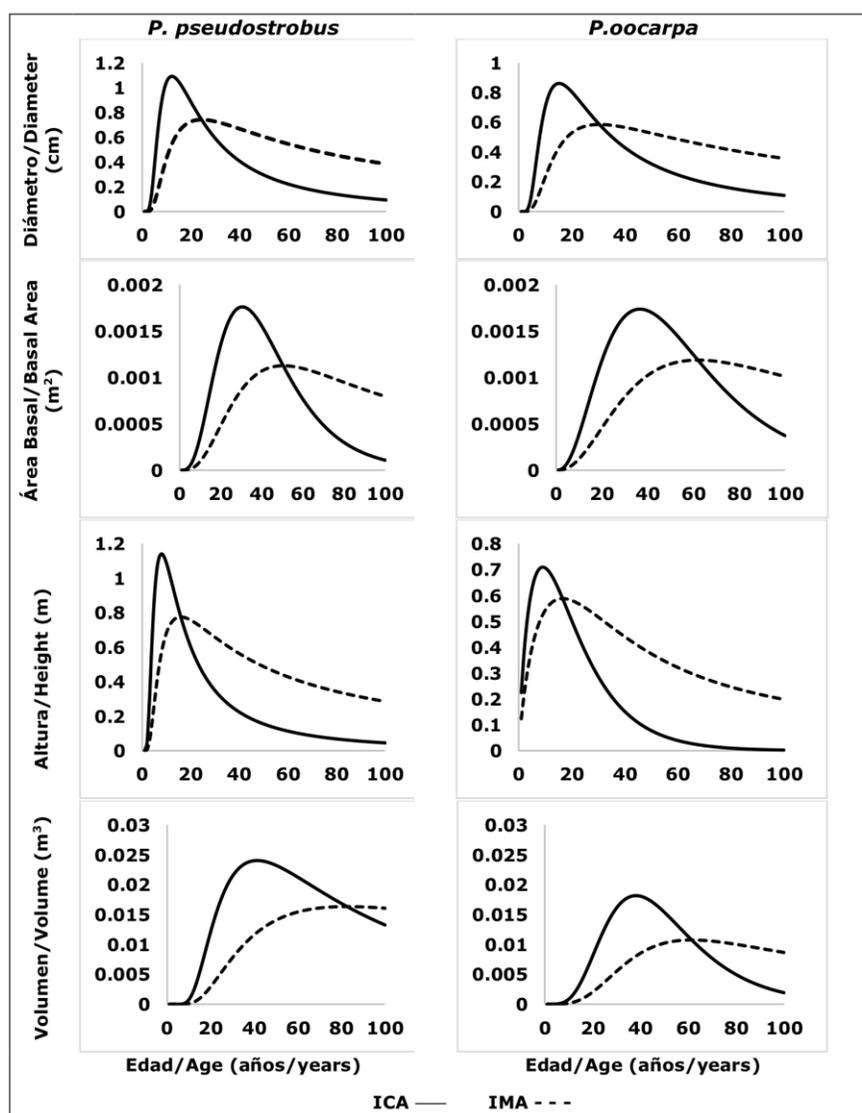
En el análisis gráfico del crecimiento en altura total, el modelo de *Schumacher* fue el que mejor predijo este crecimiento. El modelo de *Hossfeld* I exhibió una tasa de crecimiento mayor a partir de los 40 años en *Pinus pseudostrobus* y de los 60 años en *Pinus oocarpa*; mientras que los modelos de *Chapman-Richards* y *Weibull* la disminuyeron drásticamente a partir de los 50 años, y presentaron las asíntotas a edades tempranas.

Por su parte, las predicciones del crecimiento en volumen con el modelo de *Schumacher* en *Pinus pseudostrobus* y *Pinus oocarpa* fueron inferiores a las calculadas con el modelo de *Chapman-Richards* a lo largo del periodo de evaluación, en el que se programan las cortas intermedias; por lo que si se desea evitar sobrestimar el volumen aprovechable, se considera al modelo de *Schumacher* como el más apropiado para tales predicciones. A su vez, el modelo de *Chapman-Richards* presentó la asíntota a partir de los 60 años, y reflejó las estimaciones menores a partir de esa edad.

### **Máximos Incrementos Corriente Anual y Turno**

Las estimaciones obtenidas con la ecuación derivada del modelo de crecimiento en diámetro normal de *Schumacher* indicaron que los  $ICA_{m\acute{a}x}$  en diámetro en *Pinus pseudostrobus* y *Pinus oocarpa* se registraron a los 12 (1.09 cm) y 15 años (0.86 cm); los del área basal predichos con la ecuación derivada del modelo *Chapman-Richards* se obtuvieron a los 30 y 37 años (0.0017 cm), respectivamente. Los  $ICA_{m\acute{a}x}$  en altura total determinados con la ecuación derivada del modelo de *Schumacher* ocurrieron a los 8 (1.15 m) y 7 años (0.90 m). A su vez, los  $ICA_{m\acute{a}x}$  en volumen

fustal predichos con las ecuaciones derivadas de los modelos de *Chapman-Richards* y *Schumacher* se presentaron a las edades de 38 ( $0.024 \text{ m}^3$ ) y 41 años ( $0.018 \text{ m}^3$ ) en *Pinus oocarpa* y *Pinus pseudostrobus*, respectivamente. La edad del turno físico del volumen estimada con la ecuación de *Schumacher* se determinó a los 82 años en *Pinus pseudostrobus* y 62 años en *Pinus oocarpa* (Figura 3).



**Figura 3.** Tendencias de las curvas del *ICA-IMA* que generan los modelos evaluados con respecto a las series de crecimiento.

Si ambos taxones están asociados en el mismo tipo de bosque, la diferencia en los patrones de crecimiento, el tiempo en que se registran los incrementos máximos y el turno es posible asumir que las dos especies responden de manera diferente a las mismas condiciones ambientales y niveles de productividad prevalecientes en este ecosistema. Las predicciones del crecimiento hechas con los modelos seleccionados sugieren que los individuos de *Pinus pseudostrobus* alcanzaron mayores dimensiones en diámetro, altura y volumen que los de *Pinus oocarpa* durante el periodo estudiado.

## Discusión

Los estadísticos  $R^2_{adj}$  y las *RCME* fueron muy similares entre los modelos ajustados, por lo que el análisis de las tendencias de las curvas de crecimiento que cada modelo genera con respecto a las tendencias de crecimiento observadas fue fundamental para seleccionar el modelo que mejor representó el crecimiento biológico del diámetro normal, del área basal, de la altura total y del volumen fustal en ambas especies de interés. Los modelos de *Chapman-Richards* y *Schumacher*, seleccionados como los mejores, además de ser simples y parsimoniosos (Vanclay, 1994; Vanclay y Skovsgaard 1997) tienen un comportamiento asintótico y representan curvas biológicamente realistas (Alder, 1980; Salas *et al.*, 2016).

De forma semejante a los resultados de este estudio, Arteaga (2000) registró que el modelo de *Schumacher* fue el que mejor se ajustó y representó el crecimiento en altura y volumen de *Pinus pseudostrobus* y el modelo de *Chapman-Richards* para el diámetro.

Monárrez y Ramírez (2003) indicaron que el mejor modelo para estimar el crecimiento en diámetro para *Pinus durangensis* Martínez fue el de *Schumacher* y para volumen el de *Chapman-Richards*; Corral y Návar (2005), al evaluar el comportamiento de diversos modelos determinaron que el modelo de *Chapman-*

*Richards* se ajustó adecuadamente para estimar el crecimiento en diámetro, altura y volumen en cinco especies de *Pinus* del estado de Durango.

Martínez *et al.* (2014) al ajustar los modelos de *Chapman-Richards* y *Schumacher* para evaluar el crecimiento en diámetro, altura y volumen de *Pinus hartwegii* Lindl. consignaron que, aunque ambos modelos presentaron buen ajuste, el de *Schumacher* fue el que tuvo la mejor calidad predictiva. Pacheco *et al.* (2016) mediante el ajuste de los modelos de *Schumacher*, *Chapman-Richards* y *Weibull* decidieron aplicar el segundo para estimar el crecimiento, *ICA* e *IMA* en altura de *Pinus montezumae* Lamb.

Quiñonez *et al.* (2015) establecieron al modelo de *Chapman-Richards* como el más adecuado para generar familias de curvas de crecimiento en diámetro para *Pinus lumholtzii* Robins & Ferns; De Almeida *et al.* (2019) refirieron que los modelos de *Chapman-Richards* junto con el de *Weibull* mostraron los mejores ajustes para generar curvas de crecimiento en diámetro de cinco especies de pinos. A su vez, Hernández *et al.* (2018) documentaron que el modelo de crecimiento de *Chapman-Richards* fue el que mejor se ajustó para generar curvas de índice de sitio en *Pinus ayacahuite* Ehren.

Recientemente, Hernández *et al.* (2020) al trabajar los mismos modelos que se aplicaron en este estudio a tres especies de pino del estado de Chihuahua, concluyeron que los modelos de *Chapman-Richards* y *Schumacher* fueron los que mejor representaron el crecimiento en diámetro, área basal, altura y volumen.

Si se parte del hecho de que el diámetro normal es un indicador de las fases de crecimiento de las especies estudiadas (Imaña y Encinas, 2008), la edad a la que se calculó el valor del  $ICA_{máx}$  sugiere que el periodo juvenil de *Pinus pseudostrobus* y de *Pinus oocarpa* culminó de manera natural a los 12 y 14 años, y alcanzaron diámetros de 7.5 y 6.3 cm, respectivamente. A partir de esas edades, ambas especies inician su periodo de madurez, que alcanzan a los 24 y 31 años; temporalidades relacionadas a crecimientos promedio en diámetro de 17.5 y 18.1 cm e intersecciones del *ICA-IMA* de 0.752 y 0.575 cm, respectivamente. La etapa senil inicia cuando se llega a la última edad de la madurez y se extiende hasta que

los individuos logran su máximo crecimiento, el cual es igual al valor de la asíntota. Al proyectar las estimaciones del crecimiento en diámetro con el modelo de *Schumacher*, tanto *Pinus pseudostrobus* como *Pinus oocarpa* alcanzarían el máximo crecimiento (49 y 48 cm, respectivamente) después de los 200 años.

La intersección de las curvas del *ICA* con el *IMA* indica el tiempo en que ocurren los mejores rendimientos. Con base en lo citado por Martínez *et al.* (2014), las edades en que se registra el  $ICA_{máx}$  del diámetro y la altura sirven de referencia para iniciar el programa de tratamientos intermedios, el cual termina un ciclo de corta antes de la aplicación de la corta de regeneración, edad de intersección de las curvas del *ICA* e *IMA* en volumen (turno físico). Por ello, si se desea aplicar un sistema de manejo regular se sugiere empezar la aplicación de las cortas intermedias cuando los individuos de las especies estudiadas tienen en promedio entre 10 y 15 años con el fin de promover la redistribución del agua, luz y nutrientes en los árboles residuales, para favorecer su crecimiento e iniciar la regulación de la estructura dimensional del bosque (Novák, *et al.*, 2017).

## Conclusiones

Los resultados del estudio indican que el modelo de *Schumacher* es el mejor para predecir el crecimiento en diámetro y altura tanto de *Pinus pseudostrobus* como de *Pinus oocarpa*; el área basal de *Pinus pseudostrobus* y el volumen de *Pinus oocarpa*; mientras que el modelo de *Chapman-Richards* es el mejor para predecir el crecimiento en área basal de *Pinus oocarpa* y el crecimiento en volumen de *Pinus pseudostrobus*. A su vez, *Pinus pseudostrobus* presenta mejores crecimientos en diámetro, altura y volumen que *Pinus oocarpa*. El turno físico del volumen predicho en *Pinus oocarpa* y *Pinus pseudostrobus* es de 65 y 85 años, respectivamente.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen al Fondo Sectorial Conacyt- Conafor por el financiamiento para la toma de datos durante la ejecución del Proyecto Sistema Biométrico para la Planeación del Manejo Forestal Sustentable de los ecosistemas con potencial maderable en México (CONAFOR 2013-CO1-209772), así como al Tecnológico Nacional de México a través del Instituto Tecnológico de El Salto por las facilidades otorgadas durante la realización de este trabajo.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

### **Contribución por autor**

Francisco Javier Hernández, Brenda Mireya Bretado Medrano y Ezequiel Márquez Bernal: diseño del estudio, preparación y análisis cuantitativo de los datos y redacción preliminar y final del manuscrito; Juan Abel Nájera Luna y Benedicto Vargas Larreta: revisión de los análisis cuantitativos, así como redacción final del manuscrito.

### **Referencias**

Alder D., E. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Roma, Italia: FAO. 80 p. <http://www.fao.org/3/a-ap354s.pdf> (12 de agosto de 2020).

Arteaga M., B. 2000. Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pino en Ayotoxtla, Guerrero. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 6(2): 151-157. <https://chapingo-cori.mx/revistas/articulos/doc/rchscfaVI335.pdf> (4 de agosto de 2020).

Briseño R., J., J. J. Corral R., R. Solís M., J. R. Padilla M., D. J. Vega N., P. M. López S., B. Vargas L., U. Diéguez A., G. Quiñonez B. and C. A. López S. 2020. Individual tree diameter and height growth models for 30 tree species in mixed-species and uneven-aged forest of Mexico. *Forest* 11(4): 1-429. Doi: 10.3390/f11040429.

Carmean, W. H. 1972. Site index curves for upland oaks in Central States. *Forest Science* 18: 109-120. Doi: 10.1093/forestscience/18.2.109.

Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Piennar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983. *Timber management: A quantitative approach*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA. 333 p.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2015. Caracterización y estrategias de desarrollo industrial de la Cuenca de Abasto "Centro Sur" del estado de Guerrero. Comisión Nacional Forestal, México. 166 p. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/506494/Estudio\\_de\\_cuenca\\_de\\_abasto\\_Centro-Sur\\_Guerrero.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/506494/Estudio_de_cuenca_de_abasto_Centro-Sur_Guerrero.pdf) (11 de febrero de 2021).

Corral R., S. y J. de J. Nívar C. 2005. Análisis de crecimiento e incremento de cinco pináceas de los bosques de Durango, México. *Madera y Bosques*. 11(1): 29-47. Doi:10.21829/myb.2005.1111260.

De Almeida S., M., M. R. Hernández V., J. M. Brazão P., J. G. Escobar F., C. A. López S., J. C. Hernández D. and C. Wehenkel. 2019. Sistema dinámico de crecimiento diamétrico para cinco especies de pinos en Durango, México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 6(2): 145-156. [https://www.voaxaca.tecnm.mx/revista/docs/RMAE%20vol%206\\_2\\_2019/02-RMAE\\_2019-22-Pinos-ToEdit.pdf](https://www.voaxaca.tecnm.mx/revista/docs/RMAE%20vol%206_2_2019/02-RMAE_2019-22-Pinos-ToEdit.pdf) (14 de septiembre de 2020).

Diéguez A., U., A. Rojo A., F. Castelo D., J. G. Álvarez G., M. Barrio A., F. Crecente C., J. M. González G., C. Pérez C., R. Rodríguez S., C. A. López S., M. A. Balboa M., J. J. Gorgoso V. y F. Sánchez R. 2009. *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible de Galicia*. Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFS). Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela. Xunta de Galicia,

España. 259 p. [https://mediorural.xunta.gal/sites/default/files/publicacions/2019-10/herramientas\\_selvicolas.pdf](https://mediorural.xunta.gal/sites/default/files/publicacions/2019-10/herramientas_selvicolas.pdf) (13 de septiembre de 2020).

Fien E., K. P., S. Fravera, A. Teets, A. R. Weiskittel and D. Y. Hollinger. 2019. Drivers of individual tree growth and mortality in an uneven-aged, mixed-species conifer forest. *Forest Ecology and Management* 499: 1-40. Doi: 10.1016/j.foreco.2019.06.043.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 5ª Edición. México, D.F., México. México. 90 p.

González M., M., F. Cruz C., G. Quiñonez B., B. Vargas L. y J. A. Nájera L. 2016. Modelo de crecimiento en altura dominante para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el estado de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37): 7-20. Doi:10.29298/rmcf.v7i37.48.

Hernández C., M., W. Santiago G., H. M. de los Santos P., P. Martínez A. y F. Ruíz A. 2018. Modelos de crecimiento en altura dominante e índices de sitio para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Agrociencia* 52(3): 437-452. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1680> (11 de febrero de 2011).

Hernández, F. J., J. C. Meráz A., B. Vargas L. y J. A. Nájera L. 2020. Diameter, height, basal area and volume growth of three pine species from Chihuahua, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(60): 120-143. Doi: 10.29298/rmcf.v11i60.711.

Imaña E., J. y B. Encinas O. 2008. *Epidimetría Forestal*. Brasilia: Universidade de Brasilia, Departamento de Engenharia Forestal Mérida; Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Brasilia, Brasil. 66 p. <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/epidometria-forestal/epidometria-forestal.pdf> (13 de septiembre de 2020).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 2016. Anuario estadístico y geográfico de Guerrero 2016. Instituto Nacional de Estadística

Geografía e Información. Toluca, Estado de México, México. 1-34. [http://www.diputados.gob.mx/sedia/biblio/usieg/mapas2016/gro\\_mapas.pdf](http://www.diputados.gob.mx/sedia/biblio/usieg/mapas2016/gro_mapas.pdf) (13 de septiembre de 2020).

Kiviste, A., J. G. Álvarez, G., A. Rojo A. y A. D. Ruíz G. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Monografía INIA Forestal Núm. 4. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid, España. 190 p.

Klepac, D. 1983. Incremento de árboles y masas forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo. Edo. de México, México. 279 p.

Martínez S., M., S. Madrigal H., I. Vázquez C., E. Velazco B., C. R. Morales N. y F. Villarreal G. 2014. Efecto de *Arceuthobium vaginatum* (Willd.) Presl. subsp. *vaginatum* en *Pinus hartwegii* Lindl. en Colima. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6(29): 44-55. Doi: 10.29298/rmcf.v6i29.215.

McCullagh, A., K. Black and M. Nieuwenhuis. 2017. Evaluation of tree and stand-level growth models using national forest inventory data. European Journal Forest Research 136(2): 1-9. Doi: 10.1007/s10342-017-1025-8.

Monárrez G., J. C. y H. Ramírez M. (2003). Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus durangensis* Mtz. Revista Chapingo Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente, 9(1): 45-56. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-chapingo-serie-ciencias-forestales-y-del-ambiente/21> (13 de septiembre de 2020).

Newberry, J. D. 1991. A note on Carmean's estimate of height from stem analysis data. Forest Science 37(1): 368-369. Doi:10.1093/forestscience/37.1.368.

Novák, J., D. Dušek, M. Slodičák and D. Kacálek. 2017. Importance of the first thinning in young mixed Norway spruce and European beech stands. Journal of Forest Science 63(6): 254-262. Doi: 10.17221/5/2017-JFS.

Pacheco A., G., W. Santiago J., D. Martínez S. y R. Ortiz B. 2016. Análisis del crecimiento e incremento y estimación de índice de sitio para *P. montezumae* Lamb.

en Santiago Textitlán, Sola Vega, Oaxaca. *Foresta Veracruzana* 18(2): 21-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49748829003> (11 de febrero de 2021).

Quiñonez B., G., H. M. de los Santos P. y J. G. Álvarez G. 2015. Crecimiento en diámetro para *Pinus* en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(29): 108-125. doi:10.29298/rmcf.v6i29.220.

Quiñonez B., G., G. G. García E. y O. A. Aguirre C. 2018. ¿Cómo corregir heterocedasticidad y autocorrelación de residuales en modelos de ahusamiento y crecimiento en altura? *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(49): 28-59. Doi:10.29298/rmcf.v9i49.151.

Salas C., T. G. Gregoire, D. J. Craven y H. Gilabert. 2016. Modelación del crecimiento: estado de arte. *Bosque* 37(1): 3-12: Doi: 10.4067/S0717-92002016000100001.

Santiago-García, W., H. M. de los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde y G. Ramírez-Valverde. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(2):163-172. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/36-2/8a.pdf> (26 de enero de 2021).

Sharma, R. P., A. Brunner, T. Eid and B. H. Øyen. 2011. Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors. *Forest Ecology and Management* 262(12): 2162–2175. Doi:10.1016/j.foreco.2011.07.037.

Statistical Analysis System (SAS). 2002. SAS/ETS User's Guide Version 8. SAS Institute Inc. Cary, NC. USA. n/p.

Torres R., J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. CIDE, Limusa, Noriega Editores. México, D. F., México. 472 p.

Vanclay, J. K. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forest. CAB International, Wallingford, UK. 312.

file:///Users/franciscojavier/Downloads/Modelling\_forest\_growth\_and\_yield\_Applic.pdf (15 de septiembre de 2020).

Vanclay, J. K. and J. P. Skovsgaard. 1997. Evaluating forest growth models. *Ecological Modelling* 98: 1-12. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.186.589&rep=rep1&type=pdf> (15 de septiembre de 2020).

Vargas-Larreta, B., O. A. Aguirre-Calderón, J. J. Corral-Rivas, F. Crecente-Campos and U. Diéguez-Aranda. 2013. A dominant height growth and site index model for *P. pseudostrobus* Lindl. in Northeastern Mexico. *Agrociencia* 47: 91-106. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1004/1004> (15 de septiembre de 2020).

Zimmerman, D. L., V. Núñez A., T. G. Gregoire, O. Schabenberger, J. D. Hart, M. G. Kenward, G. Molenberghs, G. Verbeke, M. Pourahmadi and P. Vieu. 2001. Parametric modelling of growth curve data: An overview. *Test* 10(1): 1-73. Doi:10.1007/BF02595823.



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)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.