



Crecimiento e incremento en biomasa y carbono de *Pinus teocote* Schltld. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede., Guerrero, México
Biomass and carbon growth and increases of *Pinus teocote* Schltld. et Cham. and *Pinus oocarpa* Schiede., state of Guerrero, Mexico

Juan Manuel Ríos-Camey¹, Oscar Alberto Aguirre-Calderón^{1*}, Eduardo Javier Treviño-Garza¹, Javier Jiménez-Pérez¹, Eduardo Alanís-Rodríguez¹ y Héctor Manuel de Los Santos-Posadas²

Abstract

The modeling of growth in biomass can be one of the most important techniques for determining the carbon stock in any interval of development in the plant, allowing to make decisions about the management of the species for climate change mitigation. The goal of this study was to adjust growth models to quantify biomass increments (B) and estimate the carbon uptake (C) in *Pinus teocote* and *Pinus oocarpa* forests in the mountain region of the state of Guerrero. Twenty-four trees per species were felled, tree trunk analyses were performed, and five growth models were adjusted in order to estimate the increments in biomass and the inflection points of the current annual increase (CAI), mean annual increase (MAI), and the technical shift where CAI and MAI intersect. Weibull's model exhibited the best adjustments for determining biomass growths; the equation for estimating biomass in *P. teocote* was: $Y = 1722.1(1 - e^{-3.933E-6 * X^{2.7928}})$, $R^2_{adj} = 0.73$, $REMC = 184.2$ kg and $\bar{e} = 125$ kg; the generated model for *P. oocarpa* was $Y = 3186.79(1 - e^{-0.000033 * X^{2.2103}})$, $adjR^2 = 0.88$ $RMSE = 155.9$ and $\bar{e} = 108.2$ kg. The analysis of the projected growth until the technical shift (107 and 126 years) yielded increments of 2.81 t of B ha^{-1} year⁻¹ in *P. teocote* and 3.64 t ha^{-1} year⁻¹ in *P. oocarpa*. The growth models are reliable and efficient for estimating biomass and inferring carbon uptake based on the application of the ring analysis technique in mature *P. oocarpa* and *P. teocote* forests in the studied region.

Keywords: Trunk analysis, growth rings, mature forest, modeling, *Pinus oocarpa* Schiede., *Pinus teocote* Schltld. et Cham.

Resumen

La modelización del crecimiento en biomasa es una de las técnicas más importantes para conocer el stock de carbono en cualquier intervalo de desarrollo en una planta, y permite tomar decisiones de manejo forestal para fines de mitigación del cambio climático. El objetivo de este estudio fue ajustar modelos de crecimiento para cuantificar incrementos en biomasa (B) y captura de carbono (C) en bosques maduros de *Pinus teocote* y *Pinus oocarpa*, en la región de la montaña del estado de Guerrero. Se derribaron 24 árboles por especie, y mediante la técnica de análisis troncales se ajustaron cinco modelos de crecimiento, posteriormente se determinaron los puntos de inflexión del incremento corriente anual (ICA), incremento medio anual (IMA) y el turno técnico. El modelo de Weibull presentó los mejores ajustes para determinar el crecimiento en biomasa aérea (B); la ecuación resultante en *P. teocote* fue $Y = 1722.1(1 - e^{-3.933E-6 * X^{2.7928}})$, $R^2_{adj} = 0.73$, $REMC = 184.2$ kg y $\bar{e} = 125$ kg. En *P. oocarpa* la ecuación de crecimiento fue $Y = 3186.79(1 - e^{-0.000033 * X^{2.2103}})$, $R^2_{adj} = 0.88$ $REMC = 155.9$ y $\bar{e} = 108.2$ kg. El análisis del crecimiento proyectado hasta el turno técnico en B (107 y 126 años) produciría incrementos de 2.81 t ha^{-1} año⁻¹ de B en *P. teocote* y 3.64 t ha^{-1} en *Pinus oocarpa*. Los modelos de crecimiento son confiables y eficientes para estimar biomasa e inferir la captura de carbono con base en la técnica de análisis troncal en bosques maduros de *P. teocote* y *P. oocarpa* en la región estudiada.

Palabras clave: Análisis troncales, anillos de crecimiento, bosque maduro, modelización, *Pinus oocarpa* Schiede., *Pinus teocote* Schltld. et Cham.

Fecha de recepción/Reception date: 4 de diciembre de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 26 de julio de 2021

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

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos. México.

*Autor por correspondencia: oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx

Introducción

Los bosques son importantes sumideros de carbono para el planeta que coadyuvan a mitigar el cambio climático producido, principalmente, por las altas concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmosfera (Ordóñez *et al.*, 2015; Palacios-Cruz *et al.*, 2020).

Generalmente, los bosques que crecen más rápido en etapas juveniles y que tienen crecimiento neto son capaces de capturar más dióxido de carbono (CO₂) del que emiten a través de la respiración, hasta estabilizar dicho proceso de forma gradual en etapas maduras (Orihuela-Belmonte *et al.*, 2013; Casiano *et al.*, 2018); entre estos figuran las plantaciones de rápido crecimiento (Telles *et al.*, 2019; Jiménez *et al.*, 2020).

Sin embargo, el rápido crecimiento de las plantas en etapas tempranas también puede ser el resultado de la presencia de factores antrópicos como incendios forestales o cambios de uso de suelo que impliquen sucesiones secundarias en el ecosistema (Aryal *et al.*, 2014). Incluso, se ha documentado que las actividades de manejo forestal mediante prácticas silvícolas impactan de forma positiva en el secuestro y almacenamiento de carbono, debido al tipo de bosque y a las condiciones de manejo (Monárrez *et al.*, 2018; Palacios-Cruz *et al.*, 2020).

La modelización del crecimiento constituye la herramienta de manejo más poderosa para tomar decisiones, por lo que con su uso es posible determinar las estrategias más adecuadas para el aprovechamiento y conservación de los recursos forestales, tanto en el presente como en el futuro (Salas *et al.*, 2016; Santiago *et al.*, 2020); además es vital para conocer la productividad de los ecosistemas, determinar crecimiento e incremento, definir turnos silvícolas y aprovechamiento de una especie en función del tiempo y la calidad del sitio (Aguirre, 2015).

En particular, la modelización de biomasa para estimar carbono es una herramienta confiable para medir la capacidad de almacenamiento de los árboles como estrategia de

mitigación del cambio climático, también es un aspecto importante para considerar en la planificación de inventarios de carbono (Fonseca *et al.*, 2021), lo que contribuye al desarrollo de prácticas de manejo sustentable y estrategias de conservación de especies, en las cuales la producción de madera no es la función principal (Cuevas y Aquino, 2020). En años recientes, se han citado alrededor de 90 trabajos de investigación relacionados con la estimación de carbono a partir de cronosecuencias (Casiano *et al.*, 2018), de los cuales 8 % se relacionan a la captura de carbono mediante el análisis y modelación de anillos de crecimiento (Reyes *et al.*, 2020); la mayoría de estos estudios se ha centrado en plantaciones forestales jóvenes (Pompa y Sigala, 2017). Es por ello, que en la presente investigación se probó la bondad de ajuste de cinco modelos de crecimiento para estimar de manera eficiente el *stock* de biomasa y la captura de carbono, a través de los anillos de crecimiento para árboles individuales en bosques maduros de *Pinus teocote* Schltdl. *et* Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede. de la región de la Montaña del estado de Guerrero, México. La hipótesis nula (H_0) planteada en la investigación es que no existen diferencias entre la captura de carbono en ambas especies estudiadas.

Materiales y Métodos

Características del área de estudio

El área de estudio se ubica entre los 17°01'45" y 17°15'30" LN y 98°39'24" LO (Figura 1), a una altitud de 1 800 a 2 100 m (INEGI, 2014), comprende los municipios Iliatenco y Malinaltepec de la región de la Montaña del estado de Guerrero, México; la vegetación predominante son bosques de pino-encino donde se desarrollan de manera natural *P. teocote* y *P. oocarpa*, en rodales puros.

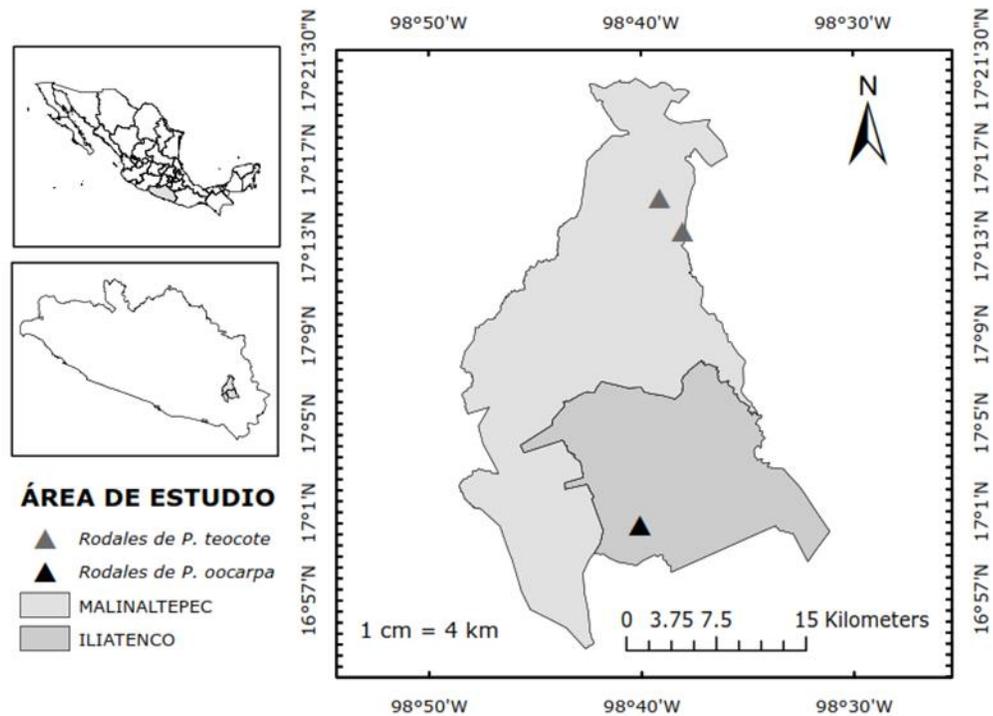


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

La zona presenta clima A(c) w₂ (2), que corresponde a templado semi-cálido, con lluvias intensas en los meses de julio-agosto; la temperatura mínima y máxima varía de -3 a 26 °C, respectivamente. El tipo de suelo en su mayoría es Regosol, con abundante materia orgánica (INEGI, 2008; INEGI, 2014).

Base de datos

Se derribaron 24 árboles dominantes por especie de rodales maduros uniespecíficos que representan todas las categorías de diámetro (5-60 cm) (Marroquín *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2019); seleccionados en 20 sitios circulares de 500 m², distribuidos aleatoriamente en cada rodal (Ancira-Sánchez y Treviño, 2015); posteriormente, se

obtuvo el número de individuos sitio⁻¹ y su extrapolación a individuos por hectárea (ind ha⁻¹): 210 ind ha⁻¹ y 190 ha⁻¹ para *P. teocote* y *P. oocarpa*, respectivamente.

Los perfiles fustales se construyeron a partir de la medición y el análisis de diferentes diámetros y el registro de las edades respectivas de las rodajas acorde a la técnica de análisis troncales (Klepac, 1976), las cuales se obtuvieron de cada árbol a una altura de 0.30 m, 1.30 m, y posteriormente cada 2 m, hasta llegar a la punta (Hernández *et al.*, 2020). Las rodajas se prepararon con una lijadora orbital DeWalt DWE6411 y Barniz transparente SAYER para madera alto brillo LT-0100 (Pineda *et al.*, 2015) para facilitar la lectura directa de anillos anuales mediante el método convencional (González *et al.*, 2016).

Análisis de variables

Se midieron los diámetros sin corteza con una regla *Arly* 3003 de 50 cm de longitud en grupos de anillos de 5 y 10 años de cada rodaja a lo largo de todo el fuste (Reyes *et al.*, 2019); posteriormente, se obtuvo el área basal (G) en m², para el volumen fustal (m³) por sección i , se empleó la sumatoria individual por tipo dendrométrico (Uranga *et al.*, 2015): tocón, trozas y puntas con base en la fórmula del cilindro (1), smalian (2) y cono (3) en orden de mención:

$$V_{toc} = G * L \quad (1)$$

$$V_{tr} = \frac{G_1 + G_2}{2} * L \quad (2)$$

$$V_c = \frac{G_3}{3} * L \quad (3)$$

Donde:

V_{toc} = Volumen de tocón

G = Área basal en m^2 de la sección del tocón

V_{tr} = Volumen de trozas (m^3)

G_1 = Área basal (m^2) de la sección mayor de la troza

G_2 = Área basal (m^2) de la sección menor de la troza

G_3 = Área basal (m^2) de la sección de puntas

L = Largo de sección (m)

Para la determinación de la biomasa fustal por sección, se aplicó el método indirecto (Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2005; Fonseca, 2017) que emplea valores de volúmenes fustales por sección y la densidad básica promedio (DB) acorde a la ecuación (4); para *P. teocote* DB fue 450 kg m^{-3} y 500 kg m^{-3} para *P. oocarpa* (Ríos, 2021).

$$Bf = DB * Vs \quad (4)$$

Donde:

Bf = Biomasa de fuste (kg) por sección de edad i

DB = Densidad básica (kg m^{-3})

Vs = Volumen fustal por sección de edad i

La biomasa aérea (B) de cada sección de edad i se obtuvo con la expresión (5), la cual adiciona el porcentaje promedio (%) de biomasa de hojas-ramas (Bhr) previamente determinado por Ríos (2021), que corresponde a 24.6 % para *P. oocarpa* y 29.6 % en *P. teocote*.

$$B = Bf + Bf * \left(\frac{Bhr}{100} \right) \quad (5)$$

Donde:

B = Biomasa aérea (kg) por sección edad i

Bf = Biomasa fustal (kg)

Bhr = Biomasa hojas-ramas (kg)

El Carbono (C) fijado en B de cada especie a la edad i , se calculó en función del producto de B por el porcentaje de C citado por Yerena *et al.* (2012) para *P. teocote* (47 %); para el caso de *P. oocarpa* se usó 48 %, cifra conservadora en comparación a lo avalado por el IPCC (2006) que corresponde a 50 % de la biomasa del árbol.

Modelos de crecimiento analizados e incrementos

Se ajustaron cinco modelos de crecimiento: *Schumacher*, *Gompertz*, *Chapman-Richards*, *Weibull* y Logístico que se usan ampliamente por su practicidad y ajustes satisfactorios en diversos estudios de crecimiento forestal (Kiviste *et al.*, 2002), los cuales se detallan en el Cuadro 1. Con la fórmula integral del mejor modelo de crecimiento ajustado, se derivó el incremento corriente anual (ICA), incremento medio anual (IMA), máximo valor del ICA (*ICA max*), del cual se estimó el turno técnico que corresponde al punto óptimo de máxima velocidad de crecimiento en biomasa caracterizado por la intersección del ICA e IMA.

Cuadro 1. Ecuaciones de crecimiento e incremento en biomasa empleados.

Modelo de crecimiento	Forma integral	Incremento corriente anual (ICA)	Incremento medio anual (IMA)	I
<i>Schumacher</i>	$Y=ae^{-b/X}+\varepsilon$	$\frac{b}{X^2} * ae^{-b/x}$	$\frac{1}{X} a e^{-b/X}$	(6)
<i>Gompertz</i>	$Y=ae^{-be^{-cX}}+\varepsilon$	$ace^{-b*e^{cX}} e^{cX}$	$-ae^{-b*e^{cX}} e^{c*X}$	(7)
<i>Chapman-Richards</i>	$Y=a[1-e^{-bX}]^f+\varepsilon$	$abc * e^{-bX} (1-e^{-b*X})^{c-1}$	$acXe^{-bX} (1-e^{-b*X})^{c-1}$	(8)
<i>Weibull</i>	$Y=a[1-e^{-bX^c}]^f+\varepsilon$	$abc * X^{c-1} e^{-b*X^c}$	$abX^c e^{-b*X^c} \ln(X)$	(9)
Logístico	$Y=\frac{a}{1+e^{b-c*X}}+\varepsilon$	$\frac{ace^{b-c*X}}{(1+e^{b-c*X})^2}$	$\frac{-ae^{b-c*X}}{(1+e^{b-c*X})^2}$	(10)

Y = Incremento de biomasa (kg); X = Edad en años; e = Base exponencial neperiana; \ln = Logaritmo natural; a, b y c = Parámetros de regresión; I = Identificador.

Para obtener el crecimiento en B y la acumulación de C en toneladas por unidad de superficie ($t\ ha^{-1}$) se aplicaron las ecuaciones 11 y 12:

$$B = Y*(N) \quad (11)$$

$$C = Y*(FC)(N) \quad (12)$$

Donde:

Y = Modelo de crecimiento elegido para estimar la B para cada especie transformados en toneladas ($t\ ha^{-1}$)

N = Número de árboles ha^{-1} promedio de sitios de muestreo

FC = Factor de conversión a carbono

Método de ajuste y selección de modelos

El ajuste se realizó con el método de máxima verosimilitud con información completa (FIML), mediante el procedimiento *MODEL* del programa estadístico SAS (SAS Institute, 2008). El mejor modelo se eligió con base en el nivel de significancia de los parámetros ($p < 0.05$), mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) (13), menores valores de la raíz del error medio cuadrático (*REMC*) (14) y del sesgo (\bar{e}) (15), así como la distribución de residuales e inspección grafica de observados y predichos (Prodan *et al.*, 1997). El diagnóstico de la autocorrelación se verificó con la prueba de *Durbin-Watson* (Ramírez *et al.*, 2018; Hernández *et al.*, 2020) y la heterocedasticidad con la prueba de *White (TW)* (Jiménez *et al.*, 2020).

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \right] * \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \quad (13)$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}} \quad (14)$$

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \quad (15)$$

Donde:

R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado

REMC = Raíz del error medio cuadrático

\bar{e} = Sesgo promedio de los residuales

p = Número de parámetros a estimar

n = Número de observaciones

Y_i = Valores observados

\hat{Y}_i = Valores predichos

\bar{Y}_i = Valor promedio estimado

Para corregir el problema de autocorrelación se utilizó un modelo de tipo autorregresivo en tiempo continuo CAR(X) con base en lo propuesto por Zimmerman y Núñez-Antón (2001):

$$e_{ij} = \sum (d_k \cdot P_k^{h_{ij} - h_{ij-k}} e_{ij-k}) + \varepsilon_{ij} \quad (16)$$

Donde:

e_{ij} = El j -ésimo residual ordinario en la observación i

d_k = 1 para $j > k$ y 0 para $j = k$

P_k = Parámetro autorregresivo de orden k a estimar

$h_{ij} - h_{ij-k}$ = Distancia de separación de la j -ésima a la $j-k$ ésima observación i cuando $h_{ij} > h_{ij-k}$

e_{ij-k} = El $j-k$ ésimo residual ordinario en la observación i

ε_{ij} = Error independiente de una distribución normal con media cero y varianza constante

Dado que la mayoría de los modelos de crecimiento son heterocedásticos (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2018), se corrigió este problema al emplear una función de ponderación en los residuales que utiliza una función de potencia de la varianza, la cual se basó en la inversa de la variable independiente (Hernández *et al.*, 2017; Guzmán *et al.*, 2020), que se expresó como:

$$y' = y * (1/E^2)^{0.5}$$

Donde:

y' = Residuales con pesos corregidos

y = Valor residual de la ecuación de crecimiento

E = Edad (años)

Resultados y Discusión

Características de la muestra

Para *P. teocote* se obtuvo un intervalo diamétrico entre 1 y 53 cm y de 0.3 a 24.2 m de altura total (AT). Para *P. oocarpa* el DN varió entre 1.5 y 59.8 cm; no obstante, la AT fluctuó entre 1.2 y 29 m (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características dasométricas de *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede, Guerrero, México.

Especie	Variable	\bar{x}	<i>s</i>	CV	EE	Min	Max
<i>P. teocote</i>	<i>E</i>	35.6	22.9	64.3	2.39	8	92
	<i>DN</i>	19.9	14.18	71.3	1.48	3.5	53
	<i>AT</i>	10.4	6.34	61.0	0.66	0.3	24.2
	<i>G</i>	0.044	0.052	118.2	0.01	0.0002	0.2124
	<i>V</i>	0.356	0.49	137.6	0.05	0.0027	2.128
	<i>B</i>	242.8	344.8	142.0	35.95	0.7	1547
<i>P. oocarpa</i>	<i>E</i>	32.43	24.17	52.2	2.1	4	104
	<i>DN</i>	22.9	15.9	69.5	3.2	2.5	59.8
	<i>AT</i>	14.4	8.3	42.3	1.5	1.2	29
	<i>G</i>	0.060	0.068	114.1	3.6	0.0002	0.2809
	<i>V</i>	0.639	0.8	103.4	0.1	0.0053	3.3589
	<i>B</i>	335.6	473.2	136.3	25.4	1.2	2359

E = Edad (años); *DN* = Diámetro normal (cm); *AT* = Altura total (m); *G* = Área basal (m²); *V* = Volumen fustal (m³); *B* = Biomasa aérea (kg); \bar{x} = Valor promedio; *s* = Desviación estándar; *CV* = Coeficiente de variación en porcentaje; *EE* = Error estándar porcentual; *Min* = Valor mínimo; *Max* = Valor máximo.

En relación a la biomasa área (B), el valor mínimo y máximo obtenido fue de 0.7 ($DN=3.5$ cm) y 1547 kg ($DN=53$ cm) en *P. teocote*. En *P. oocarpa* el intervalo fue de 5 a 2 359 kg de B ($DN=4.6$ y 59 cm, respectivamente).

Función de crecimiento en biomasa

Todos los modelos de crecimiento en biomasa de bosques maduros para las dos especies de *Pinus* evaluadas presentaron problemas de heterocedasticidad ($TW < 0.05$); posterior al procedimiento de corrección de residuales, el modelo Logístico en *P. teocote* siguió presentando problemas de heterocedasticidad ($TW = 0.016$); en ese mismo sentido, el modelo de *Schumacher* y *Chapman-Richards* para *P. oocarpa* tuvieron el mismo problema ($TW < 0.05$); por lo tanto, se descartaron. Con los modelos restantes, se logró reducir al mínimo la heterocedasticidad y con ello se tuvo mejor distribución de residuales (Guzmán *et al.*, 2020); de dichos modelos de crecimiento, el modelo de *Weibull* destacó los mayores valores de $R^2_{adj} = 0.73$ y 0.88, valores más bajos de la *REMC* (184.2 y 155.9), sesgo promedio (\bar{e}) de 125 y 108.2 kg, asimismo presentó valores de $TW = 0.0720$ y $TW = 0.1036$ para *P. teocote* y *P. oocarpa*, respectivamente (Figura 2), con parámetros altamente significativos ($p < 0.0001$); lo cual aseguró su selección para predecir el crecimiento en B de bosques maduros de las dos especies de *Pinus* evaluadas con base en sus mejores criterios estadísticos, que los del resto de los modelos de crecimiento ajustados.



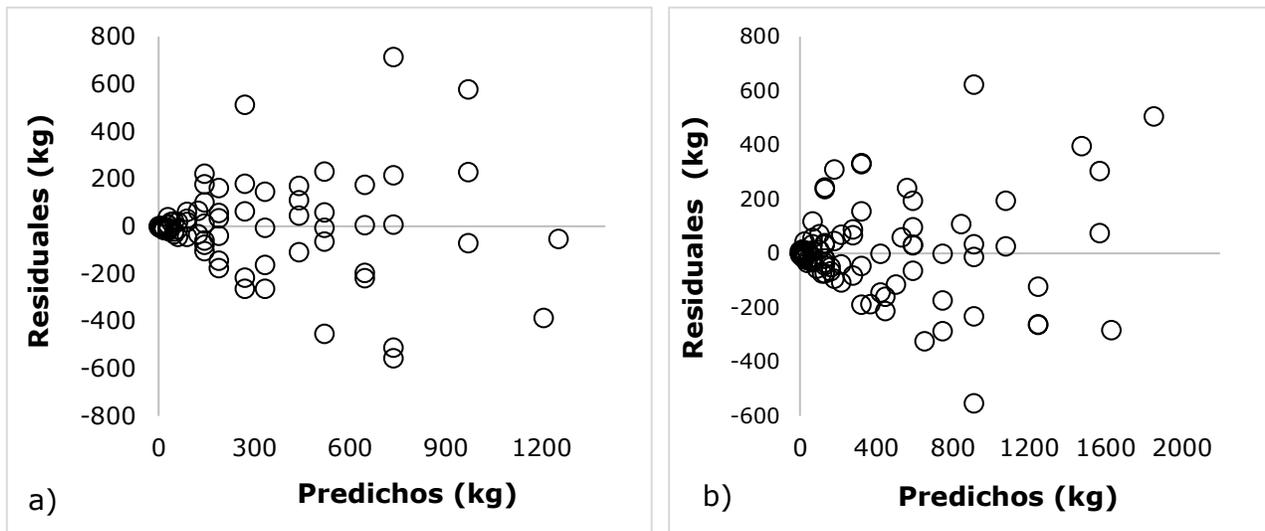


Figura 2. Distribución de residuales (kg) para estimación de biomasa (kg) en dos pináceas en Guerrero: a) *Pinus teocote* Schltdl. et Cham., b) *Pinus oocarpa* Schiede.

La bondad de ajuste estimada de los cinco modelos de crecimiento fue superior en *P. oocarpa* ($0.80 < R^2_{adj} < 0.88$), respecto a *P. teocote* ($0.65 < R^2_{adj} < 0.73$), lo cual podría deberse a la variación de la biomasa en cada categoría de edad, aunque se acentúa más en *P. teocote*. Valores similares obtuvieron Montes de Oca *et al.* (2012) en la determinación de incrementos en carbono para una regeneración natural de *Pinus duranguensis* Martínez, con valores de $R^2_{adj} = 0.85$ con el modelo exponencial; los mismos ajustes de modelización se presentaron en la estimación del crecimiento en *B* de una plantación joven (12 años) de *P. pseudostrobus* Lindl., con valores de $R^2_{adj} = 0.95$ (Méndez *et al.*, 2011). Por su parte, Návar *et al.* (2003) consignan una $R^2_{adj} = 0.90$ con el modelo de *Clutter* para la captura de carbono en plantaciones de 6 y 20 años de coníferas en Durango; dichos valores se podrían atribuir, directamente, al intervalo diamétrico y de edad del arbolado de plantaciones forestales jóvenes (López *et al.*, 2016), respecto a bosques maduros (mayores dimensiones de muestra y variación de grupos de edades) (Aguilar *et al.*, 2016; Murillo *et al.*, 2017).

Cuadro 3. Indicadores estadísticos de modelos de crecimiento en *B* de *Pinus teocote* Schltdl. *et* Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede, Guerrero.

<i>Ec</i>	<i>R²adj</i>	<i>REMC</i>	\bar{e}	<i>DW</i>	<i>TW</i>	Parámetro	Estimador	<i>EE</i>	Valor <i>T</i>	<i>Pr>F</i>
<i>P. teocote</i>										
6	0.65	203.8	148	2.09	0.0983	<i>a</i>	2 064.01	399.4	5.17	<0.0001
						<i>b</i>	90.02	5.669	15.88	<0.0001
7	0.72	185.1	136	1.83	0.0078	<i>a</i>	1 445.54	405.2	3.57	0.0006
						<i>b</i>	8.6199	1.067	8.08	<0.0001
						<i>c</i>	0.03639	0.006	5.64	<0.0001
8	0.68	208.3	129	1.74	0.0630	<i>a</i>	1 207.94	543.6	2.22	0.0288
						<i>b</i>	0.03252	0.008	3.72	0.0004
						<i>c</i>	5.44790	0.827	6.59	<0.0001
9	0.73	180	125	1.85	0.0720	<i>a</i>	1 722.1	997.4	3.73	<0.0001
						<i>b</i>	3.933E-6	5.6E-6	7.70	<0.0001
						<i>c</i>	2.79286	0.4871	5.75	<0.0001
10	0.72	193.8	186	1.78	0.016	<i>a</i>	835.004	116.8	7.15	<0.0001
						<i>b</i>	5.854	0.402	14.54	<0.0001
						<i>c</i>	0.11195	0.0121	9.27	<0.0001
<i>P. oocarpa</i>										
6	0.80	211.7	137.4	1.94	0.0587	<i>a</i>	2 520.58	325.8	7.74	<0.0001
						<i>b</i>	72.348	4.87	14.85	<0.0001
7	0.84	187.3	129.3	1.97	0.2306	<i>a</i>	1 619.03	268.1	6.04	<0.0001
						<i>b</i>	7.0362	0.363	19.35	<0.0001
						<i>c</i>	0.03909	0.0040	9.74	<0.0001
8	0.88	158	117.1	1.87	0.0570	<i>a</i>	4 525.89	2833.6	1.60	0.1132*
						<i>b</i>	0.01223	0.0055	2.20	<0.0300
						<i>c</i>	2.6788	0.3213	8.34	<0.0001
9	0.88	155.5	108.2	1.83	0.1036	<i>a</i>	3 186.791	789.5	1.58	0.0300
						<i>b</i>	0.000033	0.603	-24.95	0.004
						<i>c</i>	2.210347	2E-04	4.85	0.002
10	0.84	185.4	114.7	1.92	0.060	<i>a</i>	1 509.85	148.9	10.4	<0.0001
						<i>b</i>	4.9016	0.209	23.36	<0.0001
						<i>c</i>	0.0859	0.006	14.17	<0.0001

R²adj = Coeficiente de determinación ajustado; *REMC* = Raíz del error medio cuadrático (kg); *TW* = Prueba de *White*; *DW* = Prueba de *Durbin-Watson*; *P>F* = Significancia del modelo; *a, b, c* = Parámetros estimados; *EE* = Error estándar de estimadores (kg); *Pr>T* = Valor de la probabilidad de la distribución *t* de *Student*; \bar{e} = Sesgo promedio (kg); *No significativo ($p>0.05$).

Las ecuaciones para estimar el crecimiento en biomasa quedaron expresadas de la siguiente manera: para *P. teocote* el modelo generado fue:

$$Y=1722.1(1-e^{-3.933E-6*X^{2.7928}})$$

P. oocarpa la ecuación de crecimiento fue:

$$Y=3186.79(1-e^{-0.000033*X^{2.2103}}).$$

En la Figura 3 se proyectan las curvas de crecimiento en *B* (kg) con el modelo seleccionado, asimismo se representa su equivalencia en *C*. La acumulación de biomasa y carbono a través del tiempo fue mayor en *Pinus oocarpa*.

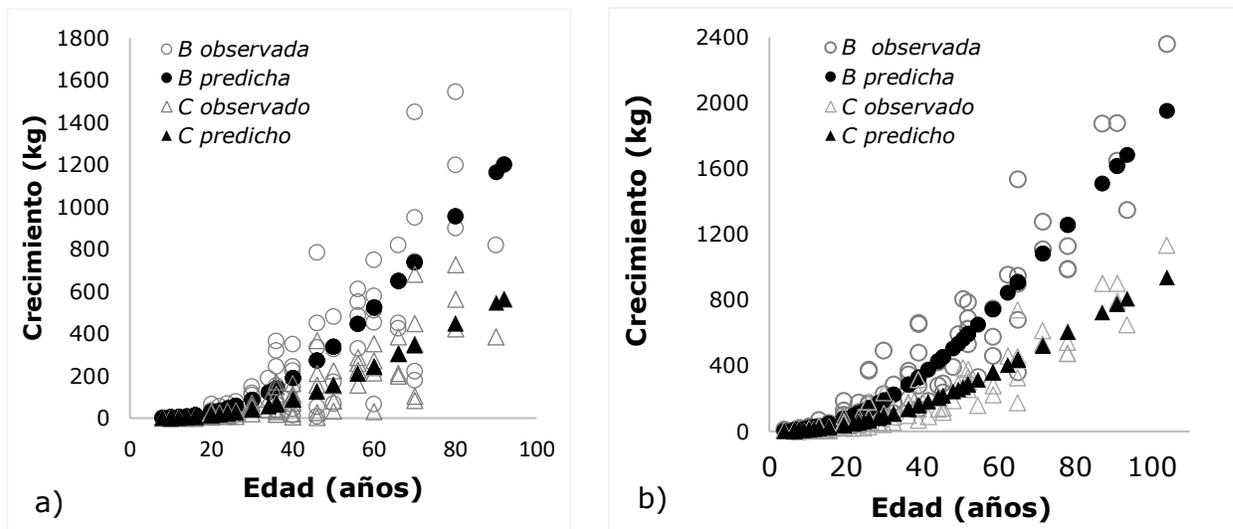
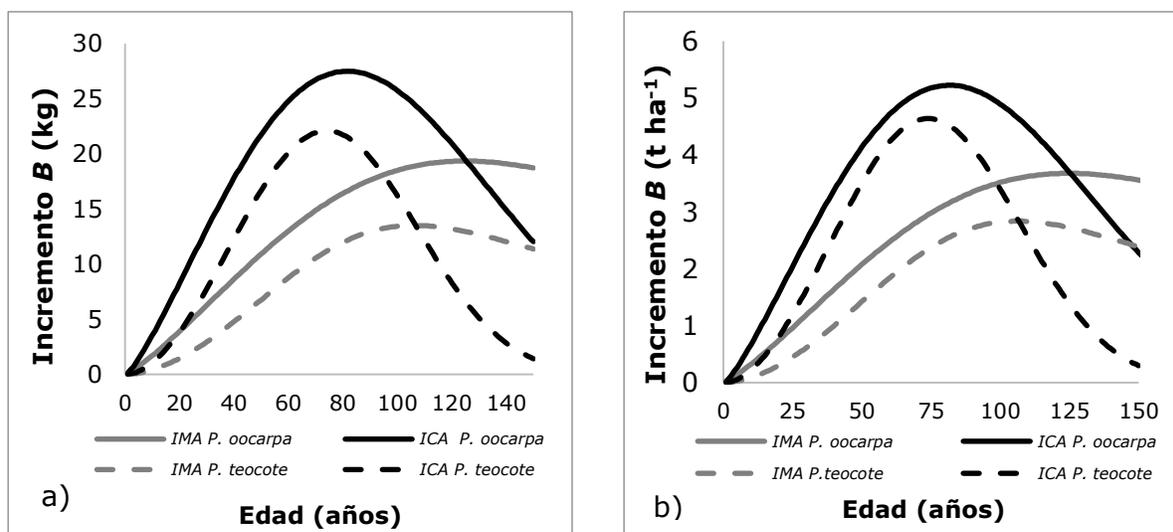


Figura 3. Curva de crecimiento en *B* y *C* de *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. (a) y *Pinus oocarpa* Schiede (b) en la Montaña de Guerrero, México.

Estimación de incrementos anuales

El análisis de los resultados indica que *P. teocote* incrementó anualmente 13.3 kg árbol⁻¹ en *B* hasta el turno técnico (107 años); mientras que, en *P. oocarpa* los incrementos máximos se alcanzaron a los 126 años (19.7 kg de *B*). Lo anterior refleja una captura de 1.5 veces más *B* y *C* entre ambas especies y representa una diferencia de ~6.4 kg (Figura 4a); dicha proporción de captura de carbono es similar a lo señalado por Méndez *et al.* (2011) en plantaciones forestales jóvenes de 12 años, quienes determinaron que *P. pseudostrobus* capturó en promedio 1.6 veces más carbono que *P. devoniana*, hasta el turno técnico (12 años), sin embargo, la diferencia fue de 50.8 kg de *B* entre ambos taxones.



IMA = Incremento medio anual; ICA = Incremento corriente anual

Figura 4. Secuencia del incremento anual en *B* en kg (a) y en t ha⁻¹ año⁻¹ en *Pinus teocote* Schltl. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede en la Montaña de Guerrero, México.

El crecimiento instantáneo (*ICA max*) fue de 21.93 kg en *P. teocote* a los 76 años, mismos que representan 4.6 t ha⁻¹ año⁻¹ de *B* y 2.16 t ha⁻¹ año⁻¹ de *C*; para *P. oocarpa* el valor de *ICA max* fue de 27.4 kg a los 84 años (Figura 4a), que proyectado

a $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ fue de 5.21 (*B*) y 2.50 (*C*). Con ello, se obtendrían incrementos hasta el turno técnico ($ICA=IMA$) de 2.81 y 1.32 $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ de *B* y *C* en *P. teocote*; para *P. oocarpa* los incrementos serían 3.64 (*B*) y 1.74 (*C*) $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ (Figura 4b).

En la Figura 5, se presenta la proyección acumulada para *B* en $t\ ha^{-1}$, la cual podría extenderse fuera de los límites del crecimiento biológico acorde a la predicción del modelo de crecimiento seleccionado. Por ello, habría que considerar como límite el punto de inflexión cuando $ICA = IMA$ (turno técnico); en ese sentido, *P. teocote* alcanzaría hasta 303.6 $t\ ha^{-1}$ de *B*, que representan 142.69 $t\ ha^{-1}$ de *C*. A su vez, en *P. oocarpa* se tendrían 463 $t\ ha^{-1}$ de *B* (222 $t\ ha^{-1}$ de *C*). Lo anterior solo sería válido, si todos los árboles presentes por hectárea alcanzaran en conjunto el turno técnico.

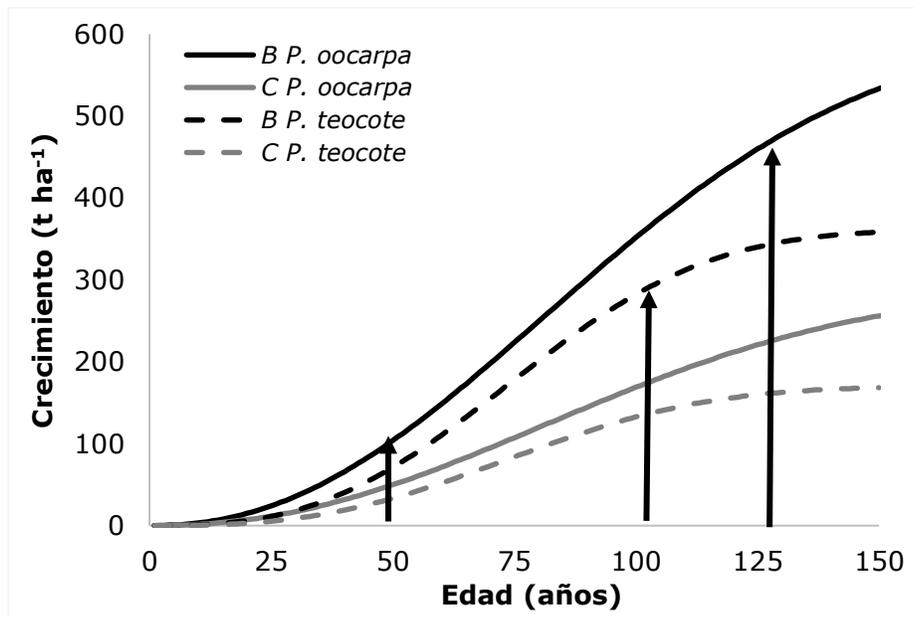


Figura 5. Proyección del crecimiento acumulado en $t\ ha^{-1}$ de *B* y *C* hasta el turno técnico y edad base (50 años) en *Pinus teocote* Schltld. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede, Montaña de Guerrero, México.

Al considerar como referencia una edad base de 50 años, comúnmente empleada para estimaciones de índices de sitio en bosques de *Pinus* (Vargas *et al.*, 2010; Pimienta-de la Torre *et al.*, 2020), se infiere que *P. teocote* capturaría 71 t de *B* ha⁻¹ (33 t de *C* ha⁻¹) y *P. oocarpa*, en promedio, acumularía 103 t de *B* ha⁻¹ que representan 49 t de *C* ha⁻¹. Los resultados superan lo obtenido por Alberto y Elvir (2008), quienes indican 39 t de *B* ha⁻¹ acumuladas en bosques maduros de *P. oocarpa* de alta competencia en Honduras. Sin embargo, Rodríguez-Larramendi *et al.* (2016) estiman 172 y 190 t de *B* ha⁻¹ con edades de hasta 120 años en bosques de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. y *Pinus maximinoi* H.E. Moore; a su vez, Figueroa *et al.* (2010) registran 166 y 186 t ha⁻¹ de *B* en rodales de 25 años de edad de *P. patula* bajo aclareos; López *et al.* (2016) documentan hasta 128 t ha⁻¹ de *B* en plantaciones forestales de 51 años de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müell. Arg., valores superiores a los obtenidos en este estudio. Esas diferencias son atribuibles a la densidad (ind ha⁻¹) reflejada en la competencia (cobertura de copa), a la conformación anatómica o a la densidad básica de la madera de las especies (Valencia y Vargas, 2001).

Al comparar los resultados con plantaciones forestales jóvenes, Pacheco *et al.* (2007) indican 37.5 t de *B* para *P. greggi* Engelm.; Méndez *et al.* (2011) indican 10.42 t de *B* ha⁻¹ para plantaciones de 12 años de *P. devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrobus*, cifras muy por debajo a lo estimado en este estudio y atribuido directamente a la edad de los taxones.

De acuerdo con Villar *et al.* (2004), la cobertura vegetal y la tasa de asimilación neta son los factores que más influyen positivamente en el crecimiento en biomasa de una planta; es decir que, aunque dos especies vegetales crecen en condiciones similares, difieren notablemente en su capacidad de crecimiento debido a la abundancia de agua, nutrientes y lo más importante, el componente genético.



Conclusiones

La técnica de análisis troncal en combinación con los valores de densidad básica de la madera permite estimar el crecimiento en biomasa área y la captura de carbono en rodales maduros de *P. oocarpa* y *P. teocote*, lo que incidirá en mejorar las intervenciones silvícolas ajustadas al objetivo de planeación forestal, tales como los inventarios de carbono. El modelo de crecimiento de *Weibull* presenta los mejores estadísticos para estimar el crecimiento en biomasa e inferir la captura de carbono de las dos especies estudiadas. En general, *P. oocarpa* acumula 1.5 veces más biomasa y carbono en un intervalo de tiempo más amplio, respecto a *P. teocote* en bosques maduros de la región de la Montaña del estado de Guerrero.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada que contribuyó al apoyo financiero para la realización del trabajo de investigación. A la Universidad Intercultural del Estado de Guerrero (UIEG) por gestionar los permisos para la realización del estudio y por facilitar equipo para el secado de muestras en laboratorio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución por autor

Juan Manuel Ríos Camey: obtención de datos de campo, redacción del manuscrito; Oscar Alberto Aguirre Calderón, Eduardo Javier Treviño Garza, Javier Jiménez Pérez y Eduardo Alanís Rodríguez: redacción, revisión, corrección y edición del manuscrito; Héctor Manuel de Los Santos Posadas: análisis estadístico y revisión del manuscrito.

Referencias

Aguilar G., P., W. Santiago J., D. Martínez S. y R. Ortiz B. 2016. Análisis del crecimiento e incremento y estimación de índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en Santiago Textitlán, Sola de Vega, Oaxaca. *Foresta Veracruzana* 18(2):21-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49748829003> (15 de octubre de 2020).

Alberto D., M. y J. Elvir A. 2008. Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 17(1): 67-78. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2591774> (29 de octubre de 2020).

Aguirre C., O. A. 2015. Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y Bosques* 21(SPE): 17-28. Doi: 10.21829/myb.2015.210423.

Aryal, D. R., H. De Jong B., S. Ochoa G., L. Esparza O. and J. Mendoza V. 2014. Carbon stocks and changes in tropical secondary forests of southern Mexico. *Agriculture, ecosystems and environment* 195(1): 220-230. Doi:10.1016/j.agee.2014.06.005.

Ancira-Sánchez, L. y E. J. Treviño G. 2015. Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques* 21(1): 77-91. <https://myb.ojs.incol.mx/index.php/myb/article/view/434/581> (6 de diciembre de 2020).

- Brown, S., J. R. Gillespe A. and E. Lugo A. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4): 881-902. Doi: 10.1093/forestscience/35.4.881.
- Casiano D., M. P, F. Rojo M., S. M. Covalada O. and D. R. Aryal. 2018. El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques* 24(spe). Doi: 10.21829/myb.2018.2401894.
- Chave, J., C. Andalo, Brown, M. A. Cairns M., J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.-P. Lescure, B. W. Nelson, H, Ogawa, H. Puig, B. Riéra and T. Yamakura 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145(1): 87-99. Doi: 10.1007/s00442-005-0100-x. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-005-0100-x> (10 de octubre de 2020).
- Cuevas C., J. C. y M. Aquino R. 2020. Ecuaciones de aditividad para la estimación de biomasa aérea de *Pinus cembroides* Zucc. *Madera y Bosques* 26(1): e2611821. Doi: 10.21829/myb.2020.2611821.
- Figueroa N., C. M., G. Ángeles P., A. Velázquez M., y H. M. De los Santos P. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista mexicana de Ciencias Forestales* 1(1): 105-112. Doi: 10.29298/rmcf.v1i1.658.
- Fonseca, W. 2017. Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales* 51(2): 91-109. Doi: 10.15359/rca.51-2.5.
- Fonseca G., W., R. Murillo C., C. Ávila A., M. Rojas V. y R.M., Spínola P. 2021. Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Revista de Ciencias Ambientales* 55(1): 143-159. Doi: 10.15359/rca.55-1.7.

- 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. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322016000500020&script=sci_arttext (15 de Mayo 2021).
- Guzmán S., J.C., O. A. Aguirre C., J. Jiménez P. y B. Vargas L. 2020. Estimación de volumen de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & amp; Cham. en diferentes entidades federativas de México. Colombia forestal 23(2): 99-113. Doi:10.14483/2256201X.15557.
- Hernández R., J., H. M. De los Santos P., J. R. Valdez L., J. C. Tamarit U., G. Ángeles P., A. Hernández R., A. Peduzzi y O. Carrero. 2017. Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Tabasco, México. Acta universitaria 27(6): 40-52. Doi: 10.15174/au.2017.1484.
- Hernández F., J., J. C. Meraz A., B. Vargas L. y J. A. Nájera L. 2020. Crecimiento en diámetro, altura, área basal y volumen para tres especies de pino en Chihuahua, México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 11(60): 120-143. Doi:10.29298/rmcf.v11i60.711.
- Klepac, D. 1976. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de Méx., México. 365 p. http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/crecimiento_e_incremento_klepac_dusan.pdf (15 de noviembre de 2020).
- Jiménez P., J., R. Telles A., E. Alanís R., J. I. Yerena Y., D. García G. y M. Gómez C. 2020. Estimación del carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* L. f. mediante ecuaciones alométricas. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 11(57): 32-56. Doi: 10.29298/rmcf.v11i57.550.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. *Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra* (volumen 4). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf (20 de noviembre de 2020).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2008. Conjunto de datos vectoriales, escala 1: 1000000. Unidades climáticas. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/> (18 octubre de 2020).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2014. Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1: 250000 Serie II (Continuo Nacional). http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx (18 de octubre de 2020).

Kiviste, K., J. G. Álvarez G., A. Rojo A. y A. D. Ruiz G. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Monografía INIA: Forestal No. 4. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid, España. 190 p.

López, R., L. Y., M. Domínguez, P. Martínez Z., J. Zavala C., A. Gómez G. y S. Posada C. 2016. Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y Bosques* 22(3): 49-60. Doi:10.21829/myb.2016.2231456.

Marroquín M., P., J. Méndez G., J. Jiménez P., O. Aguirre C. y J. Yerena. 2018. Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(47): 94-110. Doi:10.29298/rmcf.v9i47.172.

Martínez A., L., H. De los Santos P., A. Fierros G., R. Fierros M., R. Pérez M., A. Hernández R. y J. Hernández R. 2019. Factores de expansión y sistema de partición de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(51): 107-132. Doi:10.29298/rmcf.v10i51.311.

Méndez G., J., S. L. Luckie N., M. A. Capó A. y J. A. Nájera L. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45(4):479-491. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/894/894> (25 de septiembre de 2020).

Monárrez G., J. C., G. Pérez V., C. López G., M.A. Márquez L. y M. S. González E. 2018. Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques* 24(2). Doi:10.21829/myb.2018.2421569.

Montes de Oca C., E., M. Rojas A., P. García R., J. A. Nájera L., J. Méndez G. y J. Graciano L. 2012. Estimación de carbono almacenado en la regeneración natural de *Pinus durangensis* Martínez en el Salto, Durango. *Colombia Forestal* 15(2):151-159. Doi:10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a01.

Murillo B., Y., M. Domínguez D., P. Martínez Z., L. Lagunes y A. Aldrete. 2017. Índice de sitio en plantaciones de *Cedrela odorata* en el trópico húmedo de México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo* 49(1): 15-31. <http://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/3100> (14 de septiembre de 2020).

Návar J., J., N. González, D. Maldonado D., J. Graciano y V. H. Dale. 2003. Captura de Carbono en Plantaciones Forestales de Durango, México. *In: XII Congreso forestal mundial. Organización las Naciones para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Quebec, Canada. pp. 42-79.* <http://www.fao.org/forestry/87747/es/> (5 de noviembre de 2020).

Ordóñez D., J. A. B., R. V. Rivera, M.E. Tapia M. y L. R. Ahedo H. 2015. Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(32): 7-16.

Doi:10.29298/rmcf.v6i32.95.

Orihuela-Belmonte, D. E., H. J. De Jong, B. J. Mendoza-Vega, J. Van der Wal, F. Paz-Pellat, L. Soto-Pinto and A. Flamenco-Sandoval. 2013. Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 171 (1): 72-84. Doi: 10.1016/j.agee.2013.03.012.

Pacheco E., F., A. Alderete, A. Gómez G., A. Fierros G., V. M. Cetina A. y H. Vaquera. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30 (3): 251–254. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/30-3/5a.pdf> (4 de octubre de 2020).

Palacios-Cruz, D. J., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, A. M. Fierros-González y W. Santiago-García. 2020. Sistema de crecimiento y rendimiento para evaluar sumideros de carbono en bosques de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. bajo aprovechamiento forestal. *Agrociencia* 54(2): 241-257. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1904> (5 de enero 2021).

Pimienta-de la Torre, D., H. López R., P. Marroquín-Morales, J. Reyes-Reyes y J. A. Rodríguez-Morales. 2020. Índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana*, en Siltepec, Chiapas, México. *Avances en Investigación Agropecuaria* 24(3): 13-18. <http://ww.ucol.mx/revaia/portal/pdf/2020/sept/2.pdf> (15 de febrero 2021).

Pineda H. E., J. I. Valdez H., M. A. López L., F. Manzano M., y I. H. Salgado U. 2015. Incremento en diámetro y periodicidad de anillos de crecimiento de dos especies arbóreas en una selva húmeda del norte de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 21(3): 55-68. Doi: 10.21829/myb.2015.213456.

Pompa G., M. y J. Sigala R. 2017. Variación de captura de carbono de especies forestales en México: Una revisión. *Madera y Bosques* 23(2): 225-235. Doi:10.21829/myb.2017.2321512.

Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. *Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible Proyecto IICA/GTZ*. San José, Costa Rica, 561 p. <http://repiica.iica.int/docs/B4179e/B4179e.pdf> (2 de septiembre de 2020).

Quiñonez-Barraza, G., G. G. García-Espinoza y O. A. Aguirre-Calderón. 2018. ¿Cómo corregir la 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.

Ramírez M., A., W. Santiago G., G. Quiñonez B., F. Ruiz A. y P. Antúnez. 2018. Modelación del perfil fustal y volumen total para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Madera y Bosques* 24(2):e2421496. Doi:10.21829/myb.2018.2421496.

Reyes B., I. B., A. C. Acosta H., M. González C. y M. Pompa G. 2020. Perspectivas de los anillos de crecimiento para estimación potencial de carbono en México. *Madera y Bosques* 26(2):e2632112. Doi:10.21829/myb.2020.2632112.

Reyes R., J., J. A. Rodríguez M. y P. Marroquín M. 2019. Estimación de biomasa aérea total y contenido de carbono de *Pinus maximinoi* HE Moore en Las Margaritas, Chiapas, México. *Avances en Investigación Agropecuaria* 23(2):31-41. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/837/83760632004/83760632004.pdf> (15 de septiembre de 2020).

Ríos C., J. M. 2021. Sistema de ecuaciones alométricas y análisis del crecimiento e incremento de especies forestales en Guerrero, México. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, N.L., México. 137 p. <http://eprints.uanl.mx/21269/> (11 de marzo de 2021).

Rodríguez-Larramendi, L. A., F. Guevara-Hernández, L. Reyes-Muro, J. Ovando-Cruz, J. Nahed-Toral, M. Prado-López y R. A. Campos S. 2016. Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37): 77-94.
Doi:10.29298/rmcf.v7i37.53.

SAS Institute. 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition. Raleigh, NC, EE. UU.: SAS Institute Inc.
<https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm>
(1 de octubre de 2020).

Salas C., G., C. Timothy G., J. Dylan y H. Gilabert. 2016. Modelación del crecimiento de bosques: estado del arte. *Bosque (Valdivia)* 37(1): 03-12. Doi:10.4067/S0717-92002016000100001.

Santiago G., W, G. Ángeles P., G. Quiñonez B., H. M. De los Santos P. y G. Rodríguez O. 2020. Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la planeación forestal en México. *Madera y Bosques* 26(2).
Doi:10.21829/myb.2020.2622004.

Telles A., R., E. Alanís R., J. Jiménez P., O. A. Aguirre C. y E. J. Treviño G. 2019. Estimación de carbono acumulado en *Gmelina arborea* Roxb. en Tlatlaya, Estado de México mediante ecuaciones alométricas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(55): 135-153. Doi:10.29298/rmcf.v10i55.593.

Uranga V., L. P., H. M. De los Santos P., J. R. Valdez L., J. López U. y H. Navarro G. 2015. Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque. *Agrociencia* 49(7): 787-801.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000700007 (12 de marzo de 2021).

Valencia M. S. y J. Vargas H. 2001. Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula* Agrociencia 35(1): 109-120. <https://www.agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/95/95> (15 de octubre de 2020).

Vargas L., B., J. G. Álvarez G., J. J. Corral R. y O. A. Aguirre C. 2010. Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* blanco. Revista Fitotecnia Mexicana 33(4): 343-350.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000400012&lng=es&tlng=es (14 de diciembre de 2020).

Villar, R., J. Ruiz-Robledo, J. L. Quero, H. Poorter, F. Valladares y T. Marañón. 2004. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. *In*: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural (comps.). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ed. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid, España. pp. 191-227. https://www.researchgate.net/publication/46651576_Tasas_de_crecimiento_en_especies_leñosas_aspectos_funcionales_e_implicaciones_ecologicas(4 de noviembre de 2020).

Yerena Y., J. I., J. Jiménez P., O. A. Aguirre C., E. J. Treviño G. y E. Alanís R. 2012. Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 3(13): 49-56. Doi:10.29298/rmcf.v3i13.488.

Zimmerman, D. L. and V. Núñez-Antón. 2001. Parametric modelling of growth curve data: An overview. Sociedad de Estadística e Investigación Operativa Test 10:1-73. <https://core.ac.uk/download/pdf/95690399.pdf> (28 de junio de 2021).



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.