

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Volumen maderable para *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., en Michoacán, México

Timber volume for *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., in Michoacán, Mexico

Authors/Autores: Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., Barrera-Ramirez, R., García-Cuevas, X., Hernandez-Ramos, A., Buendía-Rodríguez, E.

ID: e1639

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1639>

Received/Fecha de recepción: February 19th 2024

Accepted /Fecha de aceptación: February 14th 2025

Available online/Fecha de publicación: March 07th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., Barrera-Ramirez, R., García-Cuevas, X., Hernandez-Ramos, A., Buendía-Rodríguez, E. (2025). Timber volume for *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., in Michoacán, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1639. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1639>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

Volumen maderable para *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., en Michoacán, México

Timber volume for *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., in Michoacán, Mexico

Ecuación de volumen para *Pinus leiophylla*

Volume equation for *Pinus leiophylla*

Hernández-Ramos, J.¹ (0000-0003-2685-1199), Muñoz-Flores, H. J.^{2*} (0000-0001-9344-9875), Barrera-Ramírez, R.² (0000-0002-0491-5721), García-Cuevas, X.³ (0000-0002-2481-6704), Hernández-Ramos, A.⁴ (0000-0003-4058-1316), Buendía-Rodríguez, E.⁵ (0000-0002-4264-6948).

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya San Miguel de Allende Kilómetro 6.5, 38010 Celaya, Gto., México.

²INIFAP-Campo Experimental Uruapan. Cuba 1104, Colonia Revolución, 60150 Uruapan, Mich., México.

³INIFAP-Campo Experimental Chetumal. Km. 25 Carretera Chetumal-Cancún, 77963 Xul-ha, Q. Roo, México.

⁴INIFAP-Campo Experimental Saltillo. Carretera Saltillo-Zacatecas km. 342+119 # 9515, Hacienda de Buena Vista 25315 Saltillo, Coahuila, México.

⁵INIFAP-Campo Experimental Valle de México. Carretera Los Reyes-Texcoco, km 13,5, 56250 Coatlínchán, Texcoco de Mora, Estado de México, México.

***Corresponding Author:** H. Jesús Muñoz-Flores. INIFAP-Campo Experimental Uruapan. Cuba 1104, Colonia Revolución, 60150 Uruapan, Mich., Mexico. Teléfono: 4524432074. E-mail: munoz.hipolitojesus@inifap.gob.com

RESUMEN

Las plantaciones forestales representan una alternativa viable para la producción y obtención de materias primas de forma intensiva, en un menor tiempo de crecimiento de las especies. Para obtener resultados precisos, se requiere de contar con herramientas técnicas-científicas que ayuden a la toma de decisiones para un manejo forestal adecuado. El objetivo fue seleccionar una ecuación que estime el volumen fustal para árboles individuales de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. en plantaciones forestales establecidas en la Meseta Purépecha, Michoacán, México. Con datos de diámetros (d_i) a distintas alturas sobre el fuste (A_i) y el volumen fustal (V_f) (m^3) de 43 árboles se ajustaron cinco modelos de volumen en el programa estadístico Rstudio®. El modelo de Schumacher explica una variabilidad muestral del 97.56 %, sus coeficientes significativos ($p = 0.01$), desviación global menor a $0.018 m^3$ y un sesgo individual de $0.0009 m^3$. Además, el ANOVA señala que los ajustes de los modelos son distintos entre sí, aun cuando comparten un número semejante de grados de libertad. Los residuales obtenidos presentan una distribución normal y ausencia de dispersión heterocedástica. Esta ecuación seleccionada puede ser empleadas de manera confiable (97 %) para estimar el volumen fustal de árboles establecidos en plantaciones forestales de *P. leiophylla*.

PALABRAS CLAVE: Alometría, bosques templados, modelos matemáticos, manejo forestal.

ABSTRACT

Forest plantations represent a viable alternative for the intensive production and procurement of raw materials, with a shorter growth time for the species. To obtain accurate results, it is necessary to use technical-scientific tools to assist in the decision-making process for effective forest management. This study aimed to select an equation for estimating the volume of individual trees of *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. in forest plantations established in the Meseta Purépecha, Michoacán, Mexico. Using data on diameters (d) at different heights along the trunk (A_i) and the volume (V_f) (m^3) of 43 trees, five-volume models were fitted using the statistical software RStudio®. The Schumacher model explains 97.56% of the sample variability, with significant coefficients ($p = 0.01$), an overall deviation of less than $0.018 m^3$, and an individual bias of $0.0009 m^3$. Additionally, ANOVA shows that the model fits differ, despite having similar degrees of freedom. The residuals obtained exhibit a normal distribution and an absence of heteroscedastic dispersion. This selected equation can be reliably used (97 %) to estimate the volume of trees in *P. leiophylla* forest plantations.

Keywords: Allometry, temperate forests, mathematical models, forest management.

Introducción

Las plantaciones forestales (FP) con fines comerciales forman parte de una estrategia para satisfacer la creciente demanda de productos provenientes de los recursos forestales, las cuales reducen la presión de aprovechamiento sobre los bosques naturales evitando el deterioro de estos. Además, se incrementa la productividad y competitividad maderable y no maderable, que se ve reflejado en el desarrollo económico de las zonas rurales (Prado, 2019). La evaluación y cuantificación de la productividad de las FP requiere de herramientas técnico-científicas como etiquetas de índice de sitio (Hernández *et al.*, 2022), funciones de ahusamiento (Tlaxcala-Méndez *et al.*, 2016), ecuaciones de volumen fustal (Ramos-Uvilla *et al.*, 2014), comercial o total (Hernández-Ramos *et al.*, 2018) o bien sistemas de crecimiento y rendimiento (Torres & Magaña, 2001) que faciliten la planificación y aplicación de técnicas silvícolas para hacer eficientes los procesos de producción, además de incrementar la confiabilidad en las estimaciones (Furtado *et al.*, 2013).

En el manejo forestal se utilizan variables como diámetro normal (d , cm), altura total (A_t , m) o altura de fuste limpio (A_{fl} , m) que son indispensables para una adecuada gestión de los recursos forestal es la estimación de volumen fustal (V_f , m^3), el cual es requerido para su manejo, ya sea de rodales naturales (Ramos-Uvilla *et al.*, 2014) o en este caso de plantaciones forestales (Rondón *et al.*, 2014; Gómez *et al.*, 2018). Para estimar el V_f de manera precisa y a bajo costo, se requiere del uso de tarifas (Ramírez-Martínez *et al.*, 2016; Imaña-Encinas *et al.*, 2019) o ecuaciones de volumen actualizadas, generadas a partir de técnicas estadísticas (Hernández-Ramos *et al.*, 2018).

La modelación de las relaciones alométricas del arbolado ha sido un recurso estadístico útil para la correcta estimación de sus dimensiones (Pompa-García *et al.*, 2011; García-Cuevas *et al.*, 2017). Estas herramientas cuantitativas deben de ser confiables y una opción factible por el ahorro de tiempo en el levantamiento de datos en un inventario forestal (Picard *et al.*, 2012).

En Michoacán, México las tarifas volumétricas han sido ampliamente utilizadas (Muñoz *et al.*, 2011; Sáenz *et al.*, 2013), debido a que solo requieren el d como variable predictora (Jiménez *et al.*, 1998). Sin embargo, estas expresiones matemáticas no consideran las diferencias de A_t entre los individuos (Ramírez-Martínez *et al.*, 2016). Para muchas de las especies con las que se establecen las FP en la Meseta Purépecha, Michoacán, México, no se cuenta con información específica para la cuantificación de volumen en la elaboración de programas de manejo forestal (FMP), y se utiliza una ecuación genérica o desarrollada para otras regiones. Por lo que el objetivo fue seleccionar una ecuación que estime de forma precisa el volumen fustal para arboles individuales

de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. en plantaciones forestales establecidas en la Meseta Purépecha, Michoacán, México.

Material y métodos

El estudio se realizó en FP de *P. leiophylla* establecidas en la Comunidad Indígena (IC) de Patamban del municipio de Tangancicuaro, Michoacán, México. La IC pertenece a la región fisiográfica Eje Neovolcánico Transversal, en la Sierra Meseta Purhépecha; cuenta con una superficie forestal de 11,232.07 ha⁻¹ caracterizada por ecosistema de bosque templado subhúmedo (Cw1) con lluvias en verano, temperatura media anual de 12 °C, mínima de -2 °C y máxima de 22 °C, precipitación media anual de 1,850 mm. Los suelos predominantes son de origen volcánico y generalmente corresponde a Andosol ócrico (80 %), Litosol y Cambisol crómico (INEGI, 2024). Las plantaciones de *P. leiophylla* se encuentran entre los 19° 44' de latitud norte y 102° 17' de longitud oeste y una altitud de 2,000 a 2,600 m.

Las FP evaluadas están libres de plagas y enfermedades y con supervivencia >75 %, con edades de siete a 15 años, *At* de 5 a 23 m y *d* entre 7 y 35 cm. Además, la muestra de árboles medidos cubrió la mayoría de las condiciones de crecimiento para captar las distintas formas y tamaños de fuste, de acuerdo con Prodan *et al.* (1997) y, Torres y Magaña (2001).

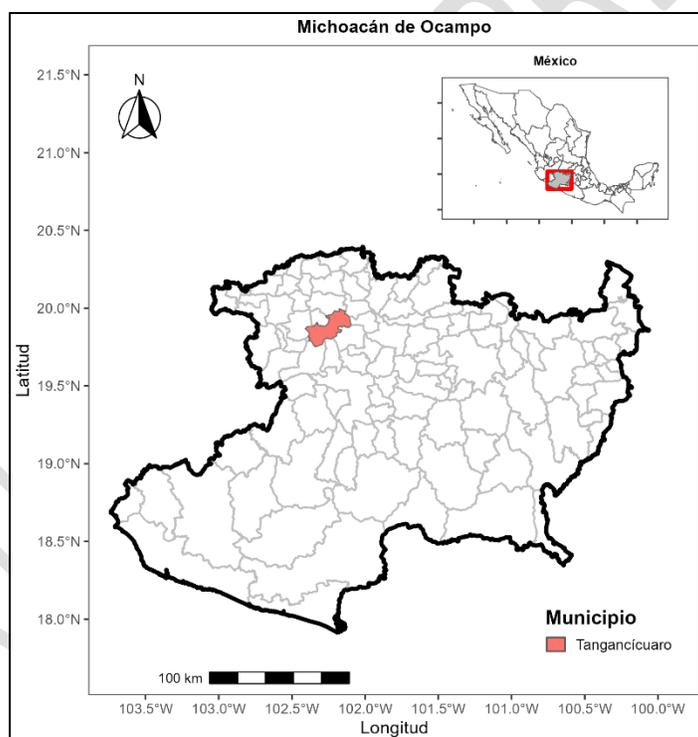


Figure 1. Location of the study area. Own elaboration.

La muestra constó de 43 árboles dominantes (263 pares de datos) seleccionados bajo la metodología de índice de sitio (Torres & Magaña, 2001), los cuales se midieron de forma indirecta para obtener el diámetro (*d_i*) a distintas alturas sobre el fuste (*A_i*) con un Relascopio Bitterlich. Las secciones medidas del fuste fueron definidas de acuerdo con la visibilidad de los diámetros. Con las dimensiones de *d* y *At*, se estimó el volumen (*V*) por sección mediante la fórmula de Smalian: $V_{troza} = \left[\left(\frac{g_{n-1} + g_i}{2} \right) L \right]$ y la punta con la fórmula del cono: $V_{punta} = \left(\frac{g_n * L}{3} \right)$. Donde: *V_{troza}* = Volumen de la troza

(m³), V_{punta} = Volumen de la punta (m³), g_{n-1} = Área basal del diámetro mayor de la troza (m²), g_i = Área basal del diámetro menor de la troza (m²), g_n = Área basal del diámetro mayor de la punta (m²), L = Longitud de la troza (m) (Prodan *et al.*, 1997; Torres & Magaña, 2001). Con esta base de datos se ajustaron dos modelos para generar tarifas y tres modelos de V_f (Tabla 1) mediante la función *nls* y la técnica de máxima verosimilitud en el programa *R*® versión 4.3.2 (R Team, 2023).

Tabla 1. Ecuaciones de volumen para plantaciones forestales de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. establecidas en la Meseta Purépecha, Michoacán, México. Elaboración propia.

No. y modelo	Expresión	Referencia bibliográfica
1. Dissescu-Stanescu	$Vf = a_1 + a_2 \cdot d^2 + \varepsilon_i$	Ramírez-Martínez <i>et al.</i> (2016) y Imaña-Encinas <i>et al.</i> (2019).
2. Berkhout	$Vf = a_1 \cdot d^{a_2} + \varepsilon_i$	
3. Spurr	$Vf = a_1 \cdot (d^2 \cdot At)^{a_2} + \varepsilon_i$	Ramírez-Martínez <i>et al.</i> (2016) y Hernández-Ramos <i>et al.</i> (2018).
4. Coeficiente mórfico constante	$Vf = a_1 \cdot (d^2 \cdot At) + \varepsilon_i$	Prodan <i>et al.</i> (1997) y Torres & Magaña (2001).
5. Schumacher	$Vf = a_1 \cdot d^{a_2} \cdot At^{a_3} + \varepsilon_i$	Rondón <i>et al.</i> (2014) y Ramírez-Martínez <i>et al.</i> (2016).

Dónde: d : diámetro normal (cm). At : altura total (m). V_f : volumen fustal (m³). a_i : parámetros a estimar. ε_i : termino de error.

Los contrastes entre las tarifas de volumen ajustadas y los modelos propuestos se realizaron a través de un análisis de varianza (ANOVA), a un nivel de confiabilidad del 99 % ($p = 0.01$). Para ello, se planteó la hipótesis nula (H_0) de igualdad entre los resultados de los ajustes y la hipótesis alternativa (H_a) en donde tanto entre las tarifas como en los modelos de volumen existen diferencias estadísticas. En cuanto a la selección del modelo se consideraron estadísticas clásicas utilizadas en los estudios forestales, donde se incluyó verificar la significancia del valor de los parámetros ($\alpha = 0.01$), los valores del coeficiente de determinación (R^2 [6]), la raíz del cuadrado medio del error (RMSE [7]) y del Sesgo [8] (Rondón *et al.*, 2014; Ramos-Uvilla *et al.*, 2014; Ramírez-Martínez *et al.*, 2016; Imaña-Encinas *et al.*, 2019).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad [6]$$

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad [7]$$

$$Sesgo = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right) \quad [8]$$

donde, y_i , \hat{y}_i y \bar{y}_i son los valores observados, estimados y promedio, respectivamente; y n es el número total de datos utilizados en el ajuste de los modelos.

Los supuestos de la regresión se verificaron a través de la prueba de normalidad de los residuos de Shapiro-Wilk (SW) donde el valor de W cercano a la unidad indicará una distribución con forma de Campana de Gauss. La dispersión de los residuales del modelo *versus* los valores ajustados tendrá que estar cercanos a cero y sin evidencia de una distribución homocedástica de los residuales, contemplando que, los valores de asimetría y curtosis no deberán de sobrepasar las tres desviaciones estándar (Martínez *et al.*, 2014).

Resultados

La estadística descriptiva de los datos indica que ninguna variable tiene problemas de asimetría y curtosis en su distribución (valor <3.0), además de que en promedio los árboles muestreados incrementan 47 cm en At por cada centímetro de incremento en la dimensión del d (Tabla 2).

Tabla 2. Estadística descriptiva de la muestra utilizada para el análisis. Elaboración propia.

Estadístico	Altura total (At , m)	Diámetro normal (d , cm)	d^2At	Volumen fustal (m^3)
Media	8.4	18.0	0.3338	0.1635
Mínimo	3.7	10.0	0.0448	0.0417
Máximo	12.0	31.0	1.1532	0.5365
Error típico	0.2881	0.8811	0.0425	0.0173
Desviación estándar	1.8894	5.7776	0.2785	0.1135
Varianza de la muestra	3.5700	33.3810	0.0776	0.0129
Curtosis	-0.3	-0.4	1.5	1.9
Coefficiente de asimetría	-0.2	0.6	1.4	1.4

Los resultados del ajuste indicaron que el modelo de Schumacher presentó indicadores de bondad de ajuste que explican de la variabilidad muestral el 97.56 % para la combinación de dimensiones de las variables d (10-31 cm) y altura (4-12 m). Además, presenta todos los coeficientes significativos ($p = 0.01$), una desviación global menor a $0.018 m^3$ y un sesgo individual de $0.0009 m^3$ (Tabla 3).

Tabla 3. Estadísticos de bondad de ajuste e indicadores de las expresiones propuestas para estimar el volumen fustal de plantaciones de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. establecidas en la Meseta Purépecha, Michoacán, México. Elaboración propia.

No.	Parámetros	Valor estimado	Error estándar	Valor de t	$Pr(> t)$	R^2	$RMSE$	Sesgo
1	a_1	-0.009784	0.00568	-1.723	0.0925	0.96963	0.01955	<0.00001
	a_2	0.000486	0.00001	36.178	<0.0001			
2	a_1	0.000288	0.00006	4.82	<0.0001	0.97130	0.01901	0.00078
	a_2	2.152000	0.06480	33.21	<0.0001			
3	a_1	0.423833	0.00815	51.98	<0.0001	0.97262	0.01901	0.00114
	a_2	0.836331	0.02467	33.91	<0.0001			
4	a_1	0.454330	0.00918	49.49	<0.0001	0.94736	0.02605	0.01236
5	a_1	0.000228	0.00005	4.651	<0.0001	0.97561	0.01817	0.00093
	a_2	1.893854	0.11206	16.901	<0.0001			
	a_3	0.455958	0.17022	2.679	0.01070			

Donde, $Pr(>|t|)$: Probabilidad al 99 % ($p=0.01$). R^2 : coeficiente de determinación. $RMSE$: raíz del cuadrado medio del error.

Aun cuando estadísticamente la expresión de Berkhout (Tabla 2) explican el 97.13 % de la distribución de los datos ($R^2 = 0.9713$) y tiene una desviación global $0.1901 m^3$ ($RMSE$) e individual de $0.00078 m^3$ (*sesgo*) con relación al modelo de doble entrada propuesto (Schumacher), esta tarifa de volumen es una alternativa confiable para estimar el Vf de estas plantaciones, ya que, no siempre se cuenta con la dimensión de la At dentro de la información de campo proveniente de un inventario forestal para realizar las estimaciones de Vf dentro de un plan de manejo forestal.

Los contrastes entre tarifas y los modelos de volumen mediante el ANOVA, señalan que se rechaza la H_0 de igualdad de ajustes, y se acepta H_a en donde se puede observar que los resultados son distintos entre sí, aun cuando comparten un número semejante de grados de libertad (Tabla 4). Las diferencias encontradas están dadas por la estructura matemática de cada expresión propuesta, tanto entre tarifas, las cuales solo utilizan al d para estimar el V_f , como entre los modelos de volumen que emplean el d y la At como variables explicativas.

Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) entre las expresiones propuestas para estimar el volumen fustal (V_f) de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. en plantaciones forestales en la Meseta Purépecha, Michoacán, México. Elaboración propia.

Modelo	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	Probabilidad (Pr>F)
1	41	0.0148			
2	42	0.0285	-0.0137	37.833	<0.0001
3	40	0.0132	0.0153	23.166	<0.0001
4	41	0.0164	-0.0032	9.815	0.0032
5	41	0.0155	<0.0001		

La prueba SW para las expresiones de Berkhout ($W = 0.93$, $p = 0.01563$) y Schumacher ($W = 0.93$, $p = 0.02134$) son cercanas a la unidad, por lo que se puede decir que las frecuencias de los residuos son tendientes a la normalidad (Figura 2a y 2c); asimismo, la distribución de los residuales es cercana a cero, sin presentar una dispersión heterocedástica en los valores ajustados para ambos modelos (Figura 2b y 2d). Por lo cual, el ajuste estadístico es considerado como robusto y adecuado.

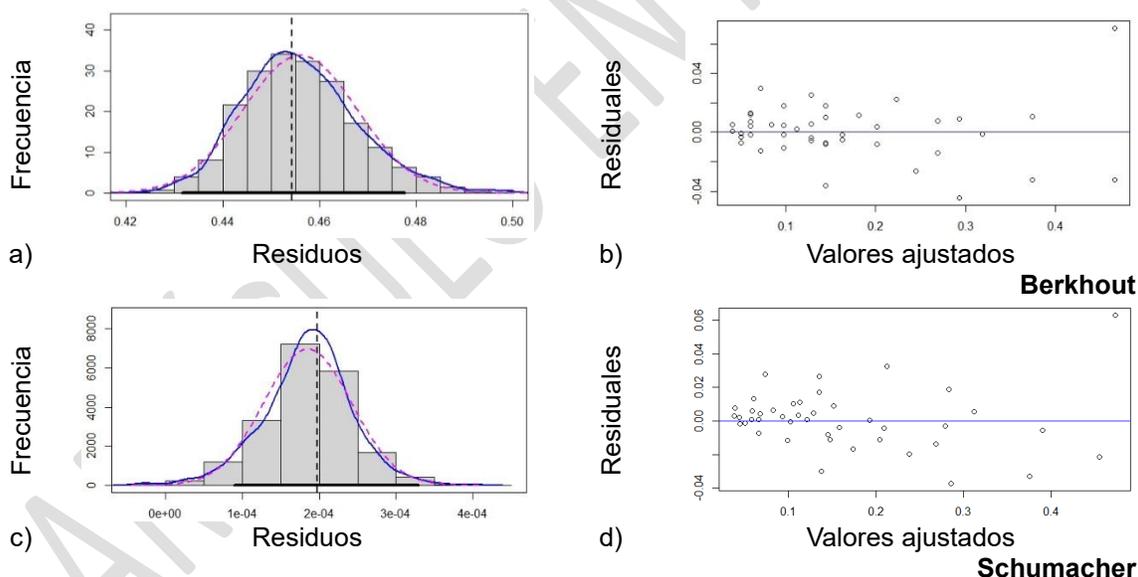


Figura 2. Pruebas gráficas de los supuestos de normalidad (a y c) y de distribución de residuales (b y d) de las expresiones propuestas para estimar el volumen fustal (V_f) de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. en Michoacán, México. Elaboración propia.

Discusión

Los ajustes estadísticos (R^2 y $RMSE$) y el sesgo encontrado en este trabajo señalaron que tanto la expresión de una entrada (Berkhout [2]), así como la de Schumacher-Hall (5) para estima el

Vf resultan factibles para su uso e implementación confiable dentro de los planes de manejo forestal para esta especie en la zona de estudio.

De forma complementaria, los resultados del ajuste (Tabla 2) en los modelos de Spurr (3) y Coeficiente mórfico constante (4) muestran que el fuste tiene una forma de tipo paraboloidal (Factor de forma (*ff*): 0.42 y 0.45), de acuerdo con la descrito por Tlaxcala-Méndez *et al.* (2016) al realizar una evaluación del *ff* y ahusamiento para arboles de distintas procedencias en *Cedrela odorata* L. en Veracruz; y Hernández-Ramos *et al.* (2018) al modelar a través de funciones de razón el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King en Quintana Roo, México.

En ambos casos no fue necesario realizar una linealización de la expresión matemática para obtener el ajuste como lo realizaron Imaña-Encinas *et al.* (2019) para plantaciones forestales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Goiás, Brasil en las tarifas de volumen de Hummel: $\log(Vf) = a_1 + a_2 \cdot \log(d) + \varepsilon_i$, y Brenac: $\log(Vf) = a_1 + a_2 \cdot \log(d) + a_3 \cdot d^{-1} + \varepsilon_i$, así como los modelos de volumen de Spurr: $\log(Vf) = a_1 + a_2 \cdot \log(d^2At) + \varepsilon_i$ y Meyer: $\log(Vf) = a_1 + a_2 \cdot d + a_3 \cdot d^2 + a_4 \cdot (d \cdot At) + a_5 \cdot (d^2At) + a_6 \cdot d + \varepsilon_i$; o la transformación de las variables explicativas de *d* y *At* con una forma logarítmica en las expresiones de Husch: $Vf = a_1 + a_2 \cdot \log(d) + \varepsilon_i$ y Schumacher: $Vf = a_1 \cdot \log(d)^{a_2} \cdot \log(At)^{a_3} + \varepsilon_i$ como lo realizaron Gómez *et al.* (2018) en plantaciones de *Hevea brasiliensis* Müell Arg. en Huimanguillo, Tabasco, México.

El uso de una expresión u otra dependerá de la disponibilidad de la información proveniente del inventario forestal, ya que muchas veces la dimensión de *At* está ausente debido al alto costo y tiempo que representa su medición en campo (García-Cuevas *et al.*, 2017; Ramírez-Martínez *et al.*, 2016). Sin embargo, es imprescindible resaltar que combinar las variables dasométricas de *d* y *At* para estimar el volumen del árbol contribuye a la precisión de las estimaciones (Ramos-Uvilla *et al.*, 2014) debido a la alta correlación entre ellas (Rondón *et al.*, 2014; Gómez *et al.*, 2018). Al contrario de las tarifas de volumen que asumen individuos con la misma dimensión de *d* tienen un mismo Vf, sin embargo, estas no consideran las variaciones de la *At* causadas por la productividad del sitio (Ramírez-Martínez *et al.*, 2016; Gómez *et al.*, 2018).

El modelo de Schumacher-Hall propuesto ha sido seleccionado para estimar el volumen en plantaciones de *Pinus maestrensis* Bisse en los municipios de Guisa, Buey Arriba y Bartolomé Masó, Cuba (Rondón *et al.*, 2014): $Vf = 0.002 \cdot d^{1.454} \cdot At^{0.164} + \varepsilon_i$; y para *Pinus ayacahuite* Ehren con y sin corteza en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México (Ramírez-Martínez *et al.*, 2016): $Vf = 0.000076 \cdot d^{1.78081} \cdot At^{1.005776} + \varepsilon_i$ y $Vf = 0.00004 \cdot d^{1.769716} \cdot At^{1.171917} + \varepsilon_i$, respectivamente.

La expresión de Berkhout (2) también fue seleccionada por no tener variables transformadas para el ajuste y su parsimonia por Ramírez-Martínez *et al.* (2016) para estimar el volumen con y sin corteza de *Pinus ayacahuite* en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México: $Vf = 0.000076 \cdot d^{1.997399} + \varepsilon_i$. y $Vf = 0.000816 \cdot d^{2.01732} + \varepsilon_i$. Aun cuando las expresiones propuestas tienen alta precisión (Sesgo <0.0009 m³ individuo⁻¹) esto puede variar de acuerdo con las condiciones de la productividad del sitio y las características genéticas de las plantaciones que se estén evaluando, así como que sean aplicadas fuera del intervalo de las dimensiones con las que fueron ajustadas o en cultivos con tratamientos silvícolas inadecuados (Prodan *et al.*, 1997; Torres & Magaña, 2001; Ramírez-Martínez *et al.*, 2016).

El *ff* promedio (0.44) resultado de este trabajo para los árboles de *P. leiophylla* en plantaciones forestales de la región de Michoacán, México, difiere del 0.60 empleado por Muñoz *et al.* (2011) y Sáenz *et al.* (2013) al realizar una evaluación de las plantaciones en la Sierra Madre Occidental y en tres municipios potenciales del oriente del estado de Michoacán, México, respectivamente. Este contraste pone de manifiesto que la actualización constante de la información silvícola cuantitativa es indispensable, ya que debido a distintas actividades silvícolas o la misma

evolución del manejo de las plantaciones ocasiono que hubiera modificaciones en su ahusamiento en los individuos de esta especie.

Conclusión

Las expresiones de Berkhout (una variable predictor) y Schumacher (dos variables predictoras) pueden ser empleadas de manera confiable, con un 97 % de precisión para estimar el volumen fustal de árboles establecidos en plantaciones forestales de *Pinus leiophylla* en la Meseta Purépecha, Michoacán, México. Además, estas expresiones son metodologías cuantitativas importantes en el cálculo de las existencias reales de FP de esta especie, de la cual, hasta el momento no se contaba con esta información.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo: XGC, JHR, HJMF y RBR.

Desarrollo de la metodología: HJMF, RBR, AHR y EBR.

Validación experimental: JHR, XGC y AHR.

Manejo de datos: RBR, EBR y JHR.

Escritura y preparación del manuscrito: JHR, EBR y XGC.

Redacción, revisión y edición: AHR, RBR y HJMF.

Administración de proyecto: HJMF, JHR y RBR.

Adquisición de fondos: RBR, HJMF y JHR.

“Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.”

Financiamiento

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, a través del proyecto “Estimación de carbono almacenado en plantaciones forestales comerciales de pino en la Sierra Purhépecha, Michoacán” con número de identificación SIGI: 2-1.6-12202035967-F-M.2.

Agradecimientos

A la Comunidad Indígena de Patamban, Michoacán y al Ing. Luis Manuel Acosta Ibarra, Prestador de Servicios Técnicos de la misma comunidad, por su apoyo en la coordinación e información de las Plantaciones Forestales Comerciales establecidas en la región de esta comunidad.

Conflicto de interés

“Los autores declaran no tener conflicto de interés”.

Referencias

Hernández R., J., Hernández-Ramos, A., Ordaz-Ruiz, G., García-Espinoza, G. G., García-Magaña, J. J., & García-Cuevas, X. (2022). Índice de sitio para plantaciones forestales de *Pinus patula* en el Estado de México. *Madera Y Bosques*, 28(2), e2822308. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822308>

- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Cuevas, X., Tamarit-Urias, J.C., Martínez-Ángel, L., & García-Magaña, J. (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21(1), 34-46. <https://doi.org/10.14483/2256201X.11965>
- Furtado, B. P., D. H. Breda, M. Lopes da Silva, H. Garcia & M. L. Marques da Silva. (2013). Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando programação inteira. *Revista Árvore*, 37(5), 881-887. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500010>
- Imaña-Encinas, J., Antunes-Santana, O. & Riesco-Muñoz, G. (2019). Selección de una ecuación volumétrica para *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en la región central del estado de Goiás, Brasil. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(39), 2-9. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i39.4406>
- García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, J., García-Magaña, J. J., Hernández-Ramos, A., Herrera-Ávila, V., González-Peralta, A. & Garfias-Mota, E. J. (2017). Predicción de diámetro normal, altura y volumen de *Abies religiosa* a partir del diámetro del tocón. *Madera bosques*, 23(3), 61-70. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331528>
- Gómez G., J. P., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P. & Ramírez V., G. (2018). Ecuaciones de volumen para estimar la producción maderable de *Hevea brasiliensis* Müell Arg. En plantaciones de etapas adulta y vejez. *Madera y Bosques*, 24(2), 1-18. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421867>
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía] (2024). Conjunto de datos vectoriales carta de uso de suelo y vegetación serie VI. Escala 1:250 000, 1^{ra} edición. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas> (22 de enero de 2024).
- Jiménez P., J., Aguirre C., O. A., Treviño G., E. J. & Domínguez C., A. (1998). Desarrollo de un sistema matemático para la elaboración de tarifas volumétricas en especies arbóreas. *Madera y Bosques*, 4(2), 67-77. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421360>
- Martínez G., M. A., A. Sánchez V., E. A. Toledo A., & J. Faulin F. (2014). *Bioestadística amigable*. 3a Edición. Elsevier España, S. L. Barcelona, España. 596 p.
- Muñoz F., H. J., Sáenz R., J. T., García M., J. J., Hernández M., E., & Anguiano C., J. (2011). Áreas potenciales para establecer plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm. en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5): 29-44. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i5.585>
- Prado D., J. A. (2019). Plantaciones forestales más allá de los árboles. CORMA sustentable. Santiago, Chile. 168 p. <https://cifag.cl/wp-content/uploads/2019/04/Libro-plantaciones.pdf>
- Pompa-García, M., H. M. de los Santos-Posadas, M. E. Zepeda-Bautista, y J. J. Corral-Rivas (2011). Un modelo dendrométrico para estimación del diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón. *Agrociencia*, 45(3), 379-387. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30219764010>
- Picard N., L. Saint-André, y M. Henry (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. Roma, Italia. 223 p. <https://www.fao.org/4/i3058s/i3058s.pdf>

- Prodan, M., R. Peters, F. Cox, & P. Real. (1997). Mensura forestal. Serie de investigación y evaluación en desarrollo sostenible. IICA, GTZ. San José, Costa Rica: 586 p.
<https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/15038/CDCR21030929e.pdf>
- Ramírez-Martínez, A., Santiago-García, W., Quiñonez-Barraza, G., Ruiz-Aquino, F., & Martínez-Antúnez, P. (2016). Modelos de volumen fustal para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 3(2), 61-74.
https://www.researchgate.net/publication/313853277_MODELOS_DE_VOLUMEN_FUSTA_L_PARA_Pinus_ayacahuite_Ehren_STEM_VOLUME_MODELS_FOR_Pinus_ayacahuite_Ehren/link/58ab434c45851504020368b2/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19
- Ramos-Uvilla, J. A., García-Magaña, J. J., Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Velarde-Ramírez, J. C., Muñoz-Flores, H. J. & García Espinoza, G. G. (2014). Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 92-108.
<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/344>
- Rondón G., D. N., Barrero M., B., & Lores P., Y. (2014). Modelo de regresión para la estimación del volumen fustal en plantaciones de *Pinus maestrensis* Bisse. *Revista Avances*, 16(3), 202-211. <https://www.redalyc.org/pdf/6378/637867045003.pdf>
- Sáenz R., J. T., Villaseñor R., F. J., Muñoz F., H. J., Rueda S. A. & Prieto R., J. A. (2013). Evaluación de plantaciones de restauración en tres municipios del estado de Michoacán. Folleto Técnico Núm. 32. SAGARPA- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC. Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México. 24 p.
- Tlaxcala-Méndez, R. M., De los Santos-Posadas, H. M., Hernández-De la Rosa, P., & López-Ayala, J. L. (2016). Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). *Agrociencia*, 50(1), 89-15.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30243765007>
- Torres, R., J. M., & Magaña T., O. S. (2001). Evaluación de plantaciones forestales. Editorial. Limusa, México. 472 p.