

Modelos de volumen fustal para *Inga punctata* en un sistema agroforestal

Stem volume models for *Inga punctata* in an agroforestry system

Martin Aquino-Ramírez¹, Rolando Misael Tlaxcala-Méndez², Aixchel Maya Martínez¹, Rubén Guillermo Medina Hernández¹ y Julio César Ríos-Saucedo^{3*}

¹INIFAP-Campo Experimental Edzná. Carretera Campeche-Pocuyaxum km 15.1. Campeche, Camp. México. C.P. 24520.

²INIFAP-Campo Experimental El Palmar. Carretera Tezonapa-El Palmar Km 15. Tezonapa, Veracruz, México. C. P.

³INIFAP - Campo Experimental Valle del Guadiana. Carretera Durango - El Mezquital km 4.5. Durango, Dgo., México. C. P. 34170.

*Autor para correspondencia: rios.julio@inifap.gob.mx

RESUMEN

Inga punctata Willd. es una especie multipropósito usada como sombra de plantaciones de café en el sur de México, sin embargo, no se cuenta con una herramienta cuantitativa que permitan estimar sus existencias maderables y cubicación en pie dentro de estos sistemas agroforestales. El objetivo de esta investigación fue ajustar seis modelos de volumen de fuste para *I. punctata* en un sistema agroforestal de café de la Sierra Sur de Oaxaca. Los datos utilizados fueron obtenidos de 31 árboles derribados a los que se les registró el diámetro normal (D) y la altura total (H), en tanto, el volumen del fuste (V_f) de cada individuo fue calculado con el método de trozas traslapadas. Los modelos fueron ajustados por regresión no lineal con el software estadístico SAS 9.2. La selección del modelo fue considerando los estadísticos del coeficiente de determinación ajustado, raíz del error medio cuadrático, sesgo promedio y los valores de significancia de los parámetros. El modelo de Schumacher y Hall mostró los mejores estadísticos de ajuste y explicó el 89 % de la variabilidad del volumen fustal observado. Este modelo contribuirá a la valoración adecuada de madera de los árboles en pie de *I. punctata* por los productores de café.

Palabras clave: agroforestería, árboles tropicales, modelos alométricos, Oaxaca.

ABSTRACT

Inga punctata Willd., it is a multipurpose species used as shade for coffee plantations in southern Mexico, however, there is no quantitative tool that allows estimating its timber stocks and standing volume within these agroforestry systems. The aim of this research was to adjust four stem volume models for *I. punctata* in a coffee agroforestry system in the Sierra Sur of Oaxaca. The data used was obtained from 31 felled trees for which diameter at breast height (D) and total height (H) were recorded, while the stem volume (V_f) of each individual was calculated with the overlapping log method. The models were fitted by nonlinear regression with SAS 9.2 statistical software. The selection of the model was considering the statistics of the adjusted coefficient of determination, root mean square error, average bias and the significance values of the parameters. The Schumacher and Hall model showed the best fit statistics and explained 89% of the variability in observed stem volume. This model will contribute to the adequate valuation of wood from *I. punctata* trees by coffee producers.

Keywords: agroforestry, tropical trees, allometric models, Oaxaca.



INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales son considerados como sistemas productivos sostenibles ya que proporcionan productos agrícolas y forestales a los dueños de los terrenos como madera, leña, frutos, forraje, medicinas, entre otros, así como servicios como sombra para cultivos y animales, protección y mejoramiento del suelo (Román et al., 2016; Sánchez-Hernández et al. 2018). Además, el componente forestal es muy importante como proveedor de servicios ambientales como almacén y captura de carbono, producción de oxígeno, belleza escénica, hábitat de diversas especies animales, abastecimiento de agua (Moraga et al., 2011; Cessa-Reyes et al., 2020).

El cultivo de café bajo sombra es un tipo de sistema agroforestal implementado por los pequeños productores y comunidades indígenas, el cual se caracteriza por la combinación de café con el aprovechamiento de diversos productos de los árboles de sombra (Escamilla y Díaz, 2016; Sánchez-Hernández et al., 2016). Además, debido a la diversidad presente pueden proporcionar distintas fuentes de ingresos que actúan como redes de seguridad social, incrementando la resiliencia económica de los productores frente a la volatilidad de los precios del café en los mercados locales y globales, y posibles pérdidas de sus cosechas (Tscharntke et al., 2011; Reed et al., 2017).

Cedrela odorata L., *Cordia alliodora* Cham., *Bursera simaruba* (L.) Sarg., *Alchornea latifolia* Sw., y leguminosas de género *Inga* y *Acrocarpus* son las especies maderables frecuentemente utilizadas en los sistemas agroforestales de café bajo sombra en México (Cessa-Reyes et al., 2020; Ruiz-García et al., 2020). La madera de estas especies representa una alternativa de ingresos económicos a los productores de café, puesto que la venden en situaciones donde el precio y la producción de café disminuye o imprevistos, por ejemplo, emergencia de salud, festividades, etc. En la mayoría de los casos los productores realizan la venta de los árboles en pie por apreciación directa sin ningún instrumento y/o herramienta que cuantifique el volumen verdadero, en consecuencia, una subestimación del volumen puede representar una pérdida económica para el productor. Ante tal situación, los productores de estos sistemas agroforestales de café requieren de herramientas cuantitativas que permita estimar de

manera confiable y fácil el volumen maderable de los árboles en pie dentro de las fincas, y con ello conocer la producción y existencias de madera.

Por otro parte, la información del volumen de los árboles puede servir para estimar la biomasa de los mismos y con ello conocer la cantidad de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de café bajo sombra. Esta información permite a los dueños y poseedores de las fincas cafetaleras participar en los mercados voluntarios de carbono (Paz-Pellat et al., 2022).

El volumen individual de los árboles puede estimarse con mediciones directas de campo como el diámetro normal y la altura total junto a la aplicación de modelos alométricos (Gonzalez-Benecke et al., 2014; Telles et al., 2018). Para desarrollar estos modelos es necesario de un muestreo destructivo, donde árboles de diferentes tamaños son derribados y con mediciones sobre el fuste y ramas se obtiene el volumen (Avery y Burkhart, 2002). Los modelos matemáticos han permitido no solo estimar el volumen total, el volumen comercial, la distribución porcentual del volumen, sino también para generar sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial que describen la distribución de productos derivados de árboles en pie (Cruz-Cobos et al., 2008; García-Espinoza et al., 2019). En la actualidad existen diferentes técnicas de regresión que son usadas para ajustar los modelos de volumen mostrando altos niveles de precisión en sus estimaciones (Diéguez-Aranda et al., 2003; Khan et al., 2018; López-Martínez et al., 2019), a la vez que se acompañan de funciones de varianza y autocorrelación para corregir problemas de heterocedastidad y correlación de los errores para obtener parámetros insesgados con mínima varianza (Quiñonez-Barraza et al., 2018).

Por lo anterior, y debido a la falta de modelos alométricos de volumen específicos por especies en los sistemas agroforestales de café en la región de la Sierra Sur de Oaxaca, México, el objetivo del presente trabajo fue ajustar seis modelos volumétricos fustales para árboles de *Inga punctata* Willd. en el municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca, México.



MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este trabajo fue realizado en un sistema agroforestal de café bajo sombra de la finca la “La cabaña”, ubicada en el municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca, entre las coordenadas 15°56'13.54" LN, 96°24'09.13" LO y 15° 55'12.85" LN, 96°23 51.83"LO, con una altitud de 700 m (Figura 1). El clima corresponde a Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (ACm), con temperatura de 18-26 °C y una precipitación anual de 1500 a 2000 mm (García, 1987). La finca se localiza en la región fisiográfica de la Sierra Sur de Oaxaca con una geomorfología de Sierra baja compleja. Las rocas son metamórficas gneis del Jurásico, con un tipo de suelo Phaeozem (INEGI, 2016). En la zona de estudio se encuentran las siguientes especies arbóreas en la vegetación nativa: *Alchornea latifolia* Sw., *Inga punctata* Willd., *Cupania dentata* DC., *Ficus* sp., *Clethra* sp., *Inga paterno* Harms, *Pterocarpus acapulcensis* Rose, *Homalium trichostemon* S.F. Blake, *Saurauia serrata* DC, *Cecropia obtusifolia* Bertol., *Diphyssa robinoides* Benth., *Lonchocarpus guatemalensis* Benth., *Abutilon purpusii* Standl., *Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC., *Cupania glabra* Sw. y *Bursera simaruba* (L.) Sarg.

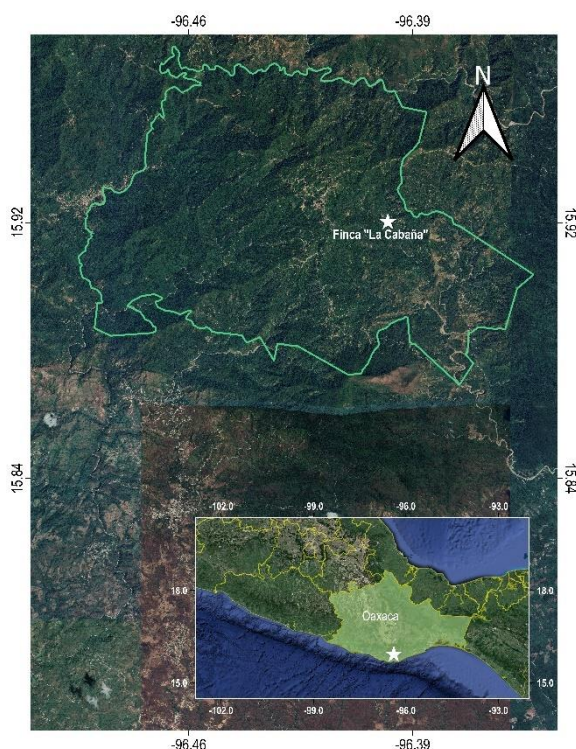


Figura 1. Localización del área de estudio.

Características de la especie bajo estudio

I. punctata es un árbol de 4 a 10 (15) m de altura; ramitas glabras, estrigosas o ferrugíneo-puberulentas y muy lenticeladas; estípulas hasta 8 mm de largo, decíduas. Hojas con 2-3 (4) pares de folíolos, elípticos a lanceolados, ápice obtuso, agudo o acuminado, glabros, seríceogrisáceos, el par distal de 6-17 por (1.7-) 3-7 cm, par basal de 3-11 por 1-5 cm; raquis cilíndrico, glándulas interfoliolares sésiles y urceoladas; pecíolo cilíndrico. Una de las principales especies de Inga más usadas como sombra para plantaciones de cafeto, se desarrolla en selvas medianas perennifolias o subperennifolias (Pennington y Sarukhán, 2005). *I. punctata* es una especie muy frecuentemente utilizada como sombra en plantaciones de café, además, esta leguminosa es considerada como multipropósito, por ejemplo, leña por el alto poder calorífico, construcción, ornamental, restauración y comestible (Luna-José y Rendón-Aguilar, 2008). Esta especie es de rápido crecimiento y con dosel fuertemente ramificado lo hacen útil para plantar en suelos degradados con el fin de restaurar su fertilidad.

Datos dasométricos

Se seleccionaron un total de 31 individuos de *I. punctata* que se distribuyeron en la zona de estudio con la finalidad de cubrir todos los tamaños posibles, crecimiento y variabilidad de la especie. Los árboles seleccionados fueron derribados a ras del suelo y seccionados en trozas de 2 m de longitud hasta que el tronco se empezó a bifurcar en la copa de árbol. En cada troza se midieron los diámetros superior e inferior, así como la longitud con cinta métrica. Antes del derribo, el diámetro fue medido a la base del árbol y a 0.3, 0.6, 0.9 y 1.3 m de altura del fuste. El cálculo del volumen de cada troza se realizó con la fórmula de Smalian (Romahn y Ramírez, 2010). Esta ecuación se describe de la siguiente forma:

$$v = \left(\frac{S_0 + S_1}{2} \right) \times L$$

donde:

v = volumen (m³)

L = longitud de la troza (m)

S_0 y S_1 = áreas de las secciones extremas de la troza (m^2)

En tanto, el volumen total del fuste por árbol (V_f) fue obtenido por el método de trozas traslapadas (Bailey, 1995).

Ajuste de modelos

En este estudio se emplearon cuatro modelos alométricos que son comúnmente utilizados para la construcción de tablas de volumen (Huang *et al.*, 1992; Diéguez-Aranda *et al.*, 2003) (Tabla 1). El ajuste de los modelos fue de tipo no lineal y para la estimación de los parámetros se usó el método de mínimos cuadrados ordinarios ponderados, ya que con esto se logra minimizar los errores de los parámetros y cumplir los supuestos de regresión.

Tabla 1. Modelos alométricos utilizados para predecir el volumen del fuste de *Inga punctata* en un sistema agroforestal de café bajo sombra.

Modelo	Expresión matemática
Variable combinada logarítmica (Spurr)	$Vf = \beta_1 (D^2 H)^{\beta_2} + \varepsilon_i$
Schumacher y Hall	$Vf = \beta_1 D^{\beta_2} H^{\beta_3} + \varepsilon_i$
Takata	$Vf = \frac{D^2 H}{\beta_1 + \beta_2 D} + \varepsilon_i$
Thornber	$Vf = \beta_1 \left(\frac{H}{D}\right)^{\beta_2} D^2 H + \varepsilon_i$
Newnham	$Vf = \beta_0 + \beta_1 D^{\beta_2} H^{\beta_3} + \varepsilon_i$
Korsun	$Vf = \beta_1 (D + 1)^{\beta_2} H^{\beta_3} + \varepsilon_i$

V_f =volumen de fuste con corteza (m^3), D = diámetro normal medido a 1.3 m sobre el nivel del suelo (cm), H = altura total (m), $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = parámetros estadísticos y ε_i = error asociado a la estimación.

Para comparar los modelos y seleccionar el mejor, se consideró los siguientes estadísticos de bondad de ajuste: Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), raíz del error medio cuadrático (RMSE) y sesgo promedio ($\bar{e}$) (Tlaxcala-Méndez *et al.*, 2016). Estos estadísticos se calcularon con las siguientes expresiones:

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

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

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

Donde:

y_i = valor observado

$\hat{y}_i$ = valor predicho

$\bar{y}$ = media

n = número de observaciones

p = número de parámetros del modelo.

Asimismo, se evaluó la significancia de los estimadores de los parámetros, a través de pruebas de hipótesis con una prueba de t Student con la hipótesis nula $H_0 = 0$ y $H_a \neq 0$, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. En el ajuste de los modelos de V_f con frecuencia se tienen problemas de heterocedasticidad, por lo cual se procedió a incluir una ponderación a los residuales de $1/(D^2 H)$. Todos los modelos fueron ajustados en el programa SAS/ETS® (SAS, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los árboles derribados presentaron un intervalo de D de 3 a 29 cm y H de 6.6 a 20 m, así como un volumen de fuste promedio es de $0.1333 m^3$ (Tabla 2).

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los árboles derribados de *Inga punctata* en un sistema agroforestal de café bajo sombra en Pluma Hidalgo, Oaxaca, México.

Var.	n	Máx.	Prom.	Mín.	D.E.
D	31	29.60	14.41	3.34	7.84
H	31	20.20	13.79	6.60	3.18
V_f	31	0.4792	0.1333	0.0029	0.1446

Var = variable, n = número de observaciones, Máx.= valor máximo, Prom. = valor promedio, Mín.= valor mínimo, D.E.=Desviación estándar, D = diámetro normal (cm), H = altura total (m), V_f = volumen del fuste (m^3).

La distribución de la relación del diámetro normal y volumen fustal de *Inga punctata* es presentada en la



Figura 2 y sustenta el uso de modelos no lineales en la estimación del volumen fustal.

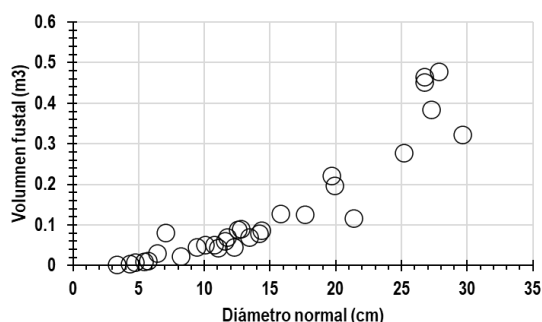


Figura 2. Comportamiento del volumen fustal y el diámetro normal de *Inga punctata*.

Los resultados de los modelos ajustados para estimar el Vf de *I. punctata* son presentados en Tabla 3 y 4. Los seis modelos ajustados presentaron valores altos en el coeficiente de regresión ajustado ($R^2_{adj} > 0.87$) y valores bajos de RMSE < 0.0500 y $\bar{e} < 0.00925$. Los parámetros en los modelos de Variable combinada y Schumacher y Hall fueron altamente significativos ($p < 0.0001$), en tanto que el modelo de Takata y Thornber el parámetro β_2 no fue significativo ($p > 0.28$). Los parámetros β_1 y β_3 en el modelo Newnham fueron no significativos ($p > 0.5$). En el modelo Korsun el parámetro β_3 no fue significativo.

Tabla 3. Parámetros estimados de los modelos para predecir el volumen del fuste de *Inga punctata* en un sistema agroforestal de café bajo sombra en Pluma Hidalgo, Oaxaca, México.

Modelo	Par.	Est.	E.E.	Pr > t
Variable combinada	β_1	0.000071	0.907794	<.0001
	β_2	0.907794	0.0883	<.0001
Schumacher y Hall	β_1	0.000249	0.116861	<.0001
	β_2	2.12092	0.2210	<.0001
	β_3	0.116861	0.3271	<.0001
Takata	β_1	28200.04	8786.5	0.0032
	β_2	196.2257	341.6	0.5701
Thornber	β_1	0.000027	3.049E-6	<.0001
	β_2	-0.27381	0.2515	0.2852
Newnham	β_0	0.006138	0.0210	<.0001
	β_1	0.000181	0.000275	0.5163
	β_2	2.212561	0.4066	<.0001
	β_3	0.117215	0.3388	0.7321
Korsun	β_1	0.00016	0.000151	<.0001

β_2	2.232205	0.2311	<.0001
β_3	0.11581	0.3270	0.7259

Par = Parámetros del modelo, Est. = valor de los parámetros estimados, E.E. = Error estándar aproximado.

Tabla 4. Estadísticos de bondad de ajuste los modelos para modelos para predecir el volumen del fuste de *Inga punctata* en un sistema agroforestal de café bajo sombra en Pluma Hidalgo, Oaxaca, México.

Modelo	R^2_{adj}	RMSE	$\bar{e}$
Variable combinada logarítmica	0.8808	0.0499	-0.00027
Schumacher y Hall	0.8943	0.0470	0.00009
Takata	0.8779	0.0505	0.00001
Thornber	0.8806	0.0500	0.00925
Newnham	0.8807	0.0478	0.00005
Korsun	0.8844	0.0470	0.00006

R^2_{adj} = coeficiente de determinación ajustado, RMSE = raíz del cuadrado medio del error, $\bar{e}$ = sesgo promedio.

El modelo de Schumacher y Hall fue seleccionado para estimar el Vf de los árboles de *I. punctata*, ya que presentó un valor alto de R^2_{adj} (89 %) y valores bajos de RMSE (0.0470 m³) y $\bar{e}$ (0.00009 m³). Por lo tanto, la ecuación generada de Vf a partir de los parámetros del Tabla 1 queda definida como:

$$Vf = 0.000249 \times D^{2.12092} \times H^{0.116861}$$

donde:

Vf=volumen fustal (m³)

D= diámetro normal (cm)

H=altura total (m)

El comportamiento grafico del modelo seleccionado no muestra evidencia de problemas de estimación del Vf, por lo que confirma a lo encontrado en los resultados de bondad de ajuste (Figura 3).

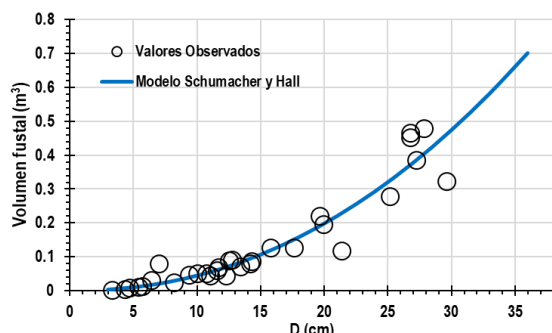


Figura 3. Valores observados de Vf y el ajuste del modelo Schumacher y Hall para predecir el Vf a partir de las variables D y H en *Inga punctata* en un sistema agroforestal de café bajo sombra en Pluma Hidalgo, Oaxaca.

La dispersión de los residuales contra valores predichos de volumen del modelo seleccionado presentó una tendencia homoscedástica (Figura 4).

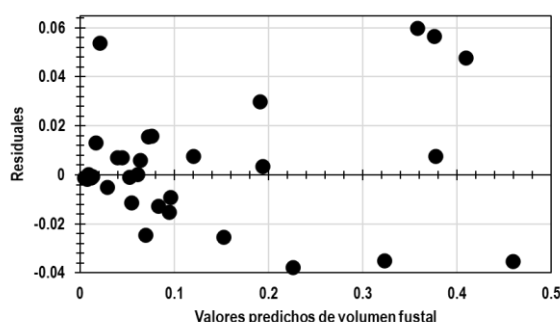


Figura 4. Distribución de los residuales del modelo de Schumacher y Hall de volumen fustal para *Inga punctata*.

El modelo seleccionado (Schumacher y Hall) en este estudio ha sido frecuentemente utilizado para la realización de tablas de volumen con resultados favorables en especies de latifoliadas (Pece *et al.*, 2002), en la predicción fustal de coníferas (Guzmán-Santiago *et al.*, 2020) y en la cubicación del fuste de plantaciones forestales comerciales (Telles *et al.*, 2018), esto se debe a la simplicidad de su estructura.

El modelo seleccionado en este estudio para estimar el Vf ha sido uno de los comúnmente utilizado para la construcción de tablas de volumen con excelentes resultados, tal como los realizados en especies de latifoliadas en Santiago del Estero, Argentina (Pece *et al.*, 2002). Por la simplicidad en su estructura, el modelo Schumacher y Hall también ha sido ajustado para la predicción fustal de coníferas (Guzmán-Santiago *et al.*, 2020) y en la cubicación del fuste en

plantaciones forestales comerciales (Telles *et al.*, 2018).

Con este modelo se logró explicar el 89 % de la variabilidad del volumen en *I. punctata*, resultados que son similares a los encontrados por Costa *et al.* (2020) al estimar el volumen del fuste de individuos de *Swietenia macrophylla* en un sistema agroforestal de cacao de la Amazonia brasileña con un valor de R^2_{adj} de 0.85. En contraste, los valores de R^2_{adj} reportados por Cañadas *et al.* (2014) fueron superiores al 97 % para las ecuaciones de volumen fustal de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales de distintas edades en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador y por Carvajal-Arroyo *et al.* (2021) en un sistema agroforestal de café en Costa Rica para el volumen comercial de *Cedrela odorata* con un R^2_{adj} de 0.99.

Diferentes autores han demostrado que al incluir la altura total como variable predictiva combinada con el diámetro normal en un modelo alométrico mejora la calidad de predicción, especialmente en especies de árboles tropicales (Xue *et al.*, 2016; Mensah *et al.*, 2016) como es el caso de los sistemas agroforestales. El uso de la altura permite tomar en cuenta la variación en volumen entre los árboles cuando se tiene el mismo valor de diámetro normal, disminuyendo así los errores de predicción (Picard *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES

El modelo ajustado de Schumacher y Hall permite predecir el volumen fustal de los árboles de *Inga punctata* de manera confiable en los sistemas agroforestales de café bajo sombra de la región de la Sierra Sur de Oaxaca, en donde las condiciones edafoclimáticas sean similares.

La ecuación generada en este trabajo representa una herramienta cuantitativa y de fácil aplicación para los productores cuando requieran conocer las existencias y la producción maderable de los árboles de sus parcelas agroforestales.

LITERATURA CITADA

- Avery, T. E., and H. E. Burkhart. (2002). Forest measurements (5th ed., pp. 456). New York, NY: McGraw-Hill Higher Education.
- Bailey, R.L. (1995). Upper-stem volumes from stem-analysis data: An overlapping bolt method.



- Canadian Journal of Forest Research, 25, 170-173. DOI:10.1139/x95-020
- Cañadas, Á., F. Vilcko, D. Rade, C. Zambrano y C. Molina. (2014). Hacia una descripción de fuste para el Laurel *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(1).
- Carvajal-Arroyo, D., R. Murillo-Cruz, M. González Rojas y W. Fonseca-González. (2021). Evaluación del crecimiento de *Cedrela odorata* L. en sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 230-249.
- Cessa-Reyes, V., O. Ruiz-Rosado and Alcudia-Armida, L. (2020). The Coffee Agroforestry System in Mexico. *Agro Productividad*, 13(11). DOI: 10.32854/agrop.v13i11.1811
- Costa, L. R. R., C. J. F. Dolácio, J.D. Zea-Camaño, R. S. Oliveira, A. L. Pelissari and M.N.M Maciel. (2020). Variabilidad espacial de *Swietenia macrophylla* en sistema agroforestal de la Amazonia brasileña. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611937. DOI: 10.21829/myb.2020.2611937
- Cruz-Cobos, F., Héctor, M. los Santos-Posadas y J. R. Valdez-Lazalde. (2008). Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia*, 42(4), 473-485.
- Diéguez-Aranda, U., M. Barrio-Anta, F. Castedo-Dorado, A. D. Ruíz-Gonzalez, M.F. AlvarézTaboada, J.G. Alvaréz-Gonzalez, y A. Rojo-Alboreca. (2003). Dendrometría. Ediciones MundiPrensa. Madrid, España. 327 p.
- Escamilla P.E. y C.S. Díaz. (2016). Sistemas de cultivo de café en México. SAGARPA. COFUPRO. CENACAFÉ. Universidad Autónoma Chapingo. Xalapa, Ver. 63 p.
- García M., E. (1987). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4a. ed. Enriqueta García de Miranda. México, D. F. 217 p.
- García-Espinoza, G. G., O. A. A. Calderón, B. Vargas-Larreta, L.M. Ángel, J. J. G. Magaña y J. H. Ramos. (2019). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Agrociencia*, 53(1), 115-131.
- Gonzalez-Benecke, C. A., S. A. Gezan, L. J. Samuelson, W. P. Cropper, D. J. Leduc and T. A. Martin. (2014). Estimating *Pinus palustris* tree diameter and stem volume from tree height, crown area and stand-level parameters. *Journal of forestry research*, 25(1), 43-52. DOI: 10.1007/s11676-014-0427-4
- Guzmán-Santiago, J. C., O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez y B. Vargas-Larreta. (2020). Estimación de volumen de *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. *Colombia forestal*, 23(2), 99-113. DOI:10.14483/2256201x.15557
- Huang, S., Titus, S. y Wiens, D. (1992). Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 22, 1297-1304. DOI: 10.1139/x92-172
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Anuario estadístico y geográfico de Oaxaca 2016. INEGI. Aguascalientes, Ags., México. 1751 p.
- Khan, M. N. I., M. C. Shil, M. S. Azad, M. N. Sadath, S. M. Feroz and A. S. Mollick. (2018). Allometric relationships of stem volume and stand level carbon stocks at varying stand density in *Swietenia macrophylla* King plantations, Bangladesh. *Forest ecology and management*, 430, 639-648. DOI:10.1016/j.foreco.2018.09.002
- López-Martínez, J. O., B. Vargas-Larreta, O. A. Aguirre-Calderón, C. G. Aguirre-Calderón, P. A. Macario-Mendoza, M. Martínez-Salvador and J. G. Álvarez-González. (2019). Compatible taper-volume systems for major tropical species in Mexico. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. DOI: 10.1093/forestry/cpz033
- Luna-José, A. D. L., y B. Rendón-Aguilar. (2008). Recursos vegetales útiles en diez comunidades de la Sierra Madre del Sur, Oaxaca, México. *Polibotánica*, (26), 193-242.
- Mensah, S., R. G. Kakaï and T. Seifert. (2016). Patterns of biomass allocation between foliage and woody structure: the effects of tree size and specific functional traits.



- Annals of Forest Research*, 59(1), 49-60. DOI: 10.15287/afr.2016.458
- Paz-Pellat, F., V. M. Salas-Aguilar, A. S. Velázquez-Rodríguez, A. Libert-Amico y M. A. Bolaños-González. (2022). Mercados de carbono para los cafetales bajo sombra de la Sierra Madre de Chiapas. *Elementos para Políticas Públicas*, 6(2), 165-186.
- Pece, M. G., C. G. de Benítez, M. J. de Galíndez and N. A. Ríos. (2002). Tabla de volumen de doble entrada para álamos de la zona de riego de Santiago del Estero, Argentina. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, (9), 95-105.
- Picard, N., F. B. Bosela and V. Rossi. (2015). Reducing the error in biomass estimates strongly depends on model selection. *Annals of forest Science*, 72(6), 811-823. DOI: 10.1007/s13595-014-0434-9
- Quiñónez Barraza, G., F. Cruz Cobos, B. Vargas Larreta y F.J. Hernández. (2012). Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(9), 23-39.
- Reed, J., van Vianen, J., Folli, S., Clendenning, J., Yang, K., MacDonald, M., and T. Sunderland. (2017). Trees for life: The ecosystem service contribution of trees to food production and livelihoods in the tropics. *Forest Policy and Economics*, 84, 62-71. DOI: 10.1016/j.forpol.2017.01.012
- Romahn de la V. C.F. y M.H. Ramírez (2010). Dendrometría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo Edo. de México. 294 p.
- Román, M. L., Mora, A. and González, G. A., 2016. Sistemas agroforestales con especies de importancia maderable y no maderable en el tóxico seco de México. *Avances de Investigación Agropecuaria*, 20(2), 53-72.
- Ruiz-García, P., A. I. Monterroso-Rivas, E. Valdés-Velarde, E. Escamilla-Prado and J. D. Gómez-Díaz. (2022). Carbon stocks in coffee (*C. arabica* L.) agroforestry systems in the face of climate change: Mexico case. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3). DOI: 10.15517/am.v33i3.48671
- Sánchez-Hernández, S., E. Escamilla-Prado, M. A., Mendoza-Briseño y N. Nazario-Lezama. (2018). Calidad del café (*coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *Agro Productividad*, 11(4). Recuperado a partir de <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/274>
- Telles A., R. C. Gómez, E. Alanís-Rodríguez, O. A. Aguirre Calderón y J. Jiménez Pérez. (2018). Ajuste y selección de modelos matemáticos para predecir el volumen fustal de *Tectona grandis* L. f. en Nuevo Urecho, Michoacán, México. *Madera y Bosques*, 24(3), e2431544. DOI: 10.21829/myb.2018.2431544
- Xue, Y., Z. Yang, X. Wang, Z. Lin, D. Li and S. Su. (2016). Tree biomass allocation and its model Additivity for *Casuarina equisetifolia* in a tropical forest of Hainan Island, China. *PloS one*, 11(3), e0151858. DOI: 10.1371/journal.pone.0151858

