



Ecuaciones de volumen para estimar la producción maderable de *Hevea brasiliensis* Müell Arg. en plantaciones de etapas adulta y vejez

Volume equations for estimating timber yield of *Hevea brasiliensis* Muell Arg in plantations of the stages of adulthood and old age

Juan Pablo Gómez González¹, Marivel Domínguez-Domínguez^{2*}, Pablo Martínez-Zurimendi^{3,4} y Gustavo Ramírez Valverde⁵

¹ Colegio de Postgraduados. Programa docente de posgrado en Producción Agroalimentaria en el Trópico del Campus Tabasco. Cárdenas, Tabasco, México.

² Colegio de Postgraduados. Campus Tabasco, Cárdenas, Tabasco, México.

³ El Colegio de la Frontera Sur. Villahermosa, Tabasco, México.

⁴ Universidad de Valladolid. Instituto Universitario de Investigación-Gestión Forestal Sostenible. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Palencia, España.

⁵ Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México, México.

* Autora de correspondencia. mdguez@colpos.mx

RESUMEN

Ante la necesidad de valorar el aprovechamiento de la madera de hule se ha generado una ecuación para la estimación de volúmenes maderables a través de modelos. Se realizó un inventario dasométrico en 11 plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.) establecidas en Huimanguillo, Tabasco. Las plantaciones presentaron edades de 25 años a 51 años, densidades de establecimiento de plantación de 570 árboles por hectárea; diámetro promedio 31.35 cm; promedio de altura dominante 27.25 m; área basal promedio 49.82 m² ha⁻¹; altura comercial 13.29 m; altura de Pressler 9.74; volumen maderable de Pressler con corteza 1.47 m³ árbol⁻¹; índice de Reineke de 876. La ecuación de volumen se ajustó considerando la forma del árbol a través del volumen de Pressler, para obtener volumen de fuste en pie. Se ajustaron modelos de volumen de Berkhout, Kopecky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer, Schumacher y Polinómico de tercer grado. Aplicando la validación cruzada, el modelo de Kopecky presentó mejor coeficiente de determinación con alta confiabilidad. Este modelo se podrá emplear para estimar volumen de árboles, generar tarifa de cubicación y evaluar el potencial productivo para el aprovechamiento maderable del hule *H. brasiliensis* en Tabasco, en un intervalo de edades de 25 años a 51 años (etapa adulta y vejez).

PALABRAS CLAVE: hule, inventario, modelo de Kopecky, Tabasco.

ABSTRACT

It is necessary evaluate the use of rubber wood; to do that, an equation has been generated for estimating timber volumes through models for ages 25-51 years. A dasometric inventory was carried out in 11 plantations of rubber (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.), established in Huimanguillo, Tabasco. Plantations are 25 to 51 years old, established planting of 570 trees per hectare; average diameter 31.35 cm; dominant average height 27.25 m; basal area 49.82 m² ha⁻¹; commercial height 13.29 m; Pressler height 9.74; Pressler timber volume with bark 1.47 m³ tree⁻¹; Reineke index 876. The volume equation was fitted considering the shape of the tree through the volume of Pressler, for bole volume standing. Berkhout volume models, Kopecky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer, Schumacher and third-degree Polynomial were tested. Applying cross-validation, the Kopecky model presented the best coefficient of determination with high reliability. This model can be used to estimate volume of trees, to generate volume mensuration rate and to evaluate the productive potential of this specie for use in Tabasco, with an age range of 25-51 years (adulthood and old age).

KEYWORDS: rubberwood, inventory, Kopecky model, Tabasco.

INTRODUCCIÓN

El hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) abastece de materia prima una de las industrias más importantes de productos forestales no maderables del mundo. Adicionalmente, el aprovechamiento de la madera de los árboles de hule ha adquirido gran importancia en la zona tropical, ya que el agotamiento de los bosques tropicales ha llevado a la escasez de madera (Reza, Hamami, Nobuchi y Suhaimi, 2011). Según Monroy, Aguirre y Jiménez (2006) los árboles de hule disminuyen el rendimiento de látex de los 25 años a 30 años de edad, después de lo cual son abandonados, quemados o derribados, sin que se aproveche su madera. Por lo anterior es aconsejable realizar el aprovechamiento de la plantación como una de las alternativas para que el productor obtenga ganancias económicas adicionales. En Tabasco existe 24% de plantaciones en estado “juvenil” (7 años a 12 años de edad), 65% en estado “adulto” (13 años a 32 años) y 11% en estado de “vejez” (mayores de 32 años de edad) (Izquierdo-Bautista, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi, Velázquez-Martínez y Córdova-Ávalos, 2011). Ratnasingam, Ioras y Wenming (2011), afirman que los árboles de hule son considerados como materia prima con aplicaciones en todos los sectores de la industria de la madera. Por sus características estructurales y anatómicas, la madera del hule es adecuada para la fabricación de muebles, tableros de fibra de densidad media, tableros de partículas, madera de chapa laminada, madera contrachapada, tablero de madera-cemento, celulosa (papel corrugado), por lo que se busca estimar la producción maderable en árboles de hule, realizando inventarios forestales para generar una tarifa de cubicación mediante la aplicación de ecuaciones alométricas.

Los modelos alométricos se emplean para estimar el volumen o la masa de los árboles y están explicados en función de pocas variables de fácil medición, tales como el diámetro normal (1.30 m), y/o la altura total (Segura y Andrade, 2008; Nívar, 2010). El diámetro es el parámetro medido en todos los árboles en la mayoría de los inventarios forestales, mientras que la altura normalmente se mide en un subconjunto de árboles (Bravo *et al.*, 2007). La edad y el número de árboles por hectárea también se incluyen como variables predictoras sistemáticas en los modelos de incremento y rendimiento (Kerala Forest Research Institute, 2006; Nívar, 2014).

El empleo de los sistemas de ecuaciones para estimación de volúmenes de árboles en pie, de aplicación sencilla, es una de las técnicas recomendadas. A través de un mayor y mejor uso de metodologías estadísticas, particularmente de los procedimientos de regresión, dichas ecuaciones han permitido alcanzar considerables reducciones de costos, sin tener que disminuir la precisión de los estimadores (Rojas-García, De Jong, Martínez-Zurimendi y Paz-Pellat, 2015). Las ecuaciones de volumen se basan en dos dimensiones básicas, el diámetro normal y la altura, la cual puede ser total o parcial (correspondiente a la parte comercial del fuste); pueden elaborarse para una sola especie o para grupos de especies o un grupo de ellas que comparten un hábito de crecimiento similar (Rojas-García *et al.*, 2015).

Existen ecuaciones de volumen para especies forestales de México (Tapia y Nívar, 1998) y para especies tropicales (Vargas-Larreta *et al.*, 2017); pero para especies plantadas para la extracción de producto principal no maderable (látex), tales como el árbol del hule, estas herramientas matemáticas son escasas (Monroy y Nívar, 2004).

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo fue proponer una ecuación de volumen para (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.) con la validación del mejor modelo, que permita estimar la producción maderable en la región de Tabasco México, en plantaciones en etapa adulta y de vejez que disminuyeron su producción de látex.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en los ejidos de Pedregal Moctezuma 1ª Sección, Ejido Guadalupe Victoria, Chicoacán, y el Guanajal, en el municipio de Huimanguillo, Tabasco. Geográficamente el área de estudio se localiza entre las coordenadas 17° 46' 27" y 17° 38' 11" de latitud norte, y entre las coordenadas 93° 29' 50" y 93° 39' 49" de longitud oeste; con una altitud promedio de 75 m snm (Fig. 1).

Los climas presentes en este municipio son: Am (f) cálido húmedo con lluvias en verano y Aw (w) cálido subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura máxima normal de 31.5 °C, mínima normal 20.9°C, media anual de 26.2°C y precipitación normal anual 2256.6 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2018). La zona de estudio corresponde al paisaje geomorfológico



de terrazas estructurales (Lomeríos), presentándose relieve con lomerío desde ligeramente convexo hasta fuertemente convexo (Ortiz-Pérez, Siebe y Cram, 2005).

Aplicación de encuestas

La aplicación de entrevistas semiestructuradas se realizó a 11 productores, considerando la base de información de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca (SEDAFOP) en vinculación con el Sistema Producto hule. El municipio de Huimanguillo se seleccionó porque ahí se distribuye 80.67% de las plantaciones de hule establecidas en Tabasco. Asimismo, se

realizaron recorridos de campo con la finalidad de conocer el manejo silvícola de las plantaciones inventariadas, el estado fisiológico de las plantaciones “adultas” (13 años a 32 años) y en etapa de “vejez” (mayores de 32 años de edad) (Monroy *et al.*, 2006; Izquierdo-Bautista *et al.*, 2011). Las plantaciones seleccionadas para realizar el inventario fueron de las siguientes edades: 25, 28, 31, 32, 34 y 51, todas ellas en años. En estas edades los árboles de hule disminuyen su rendimiento de látex con respecto al máximo, que se presenta a los 18 años de edad (Rojo-Martínez, Jasso-Mata, Vargas, Velázquez-Martínez y Palma, 2002).

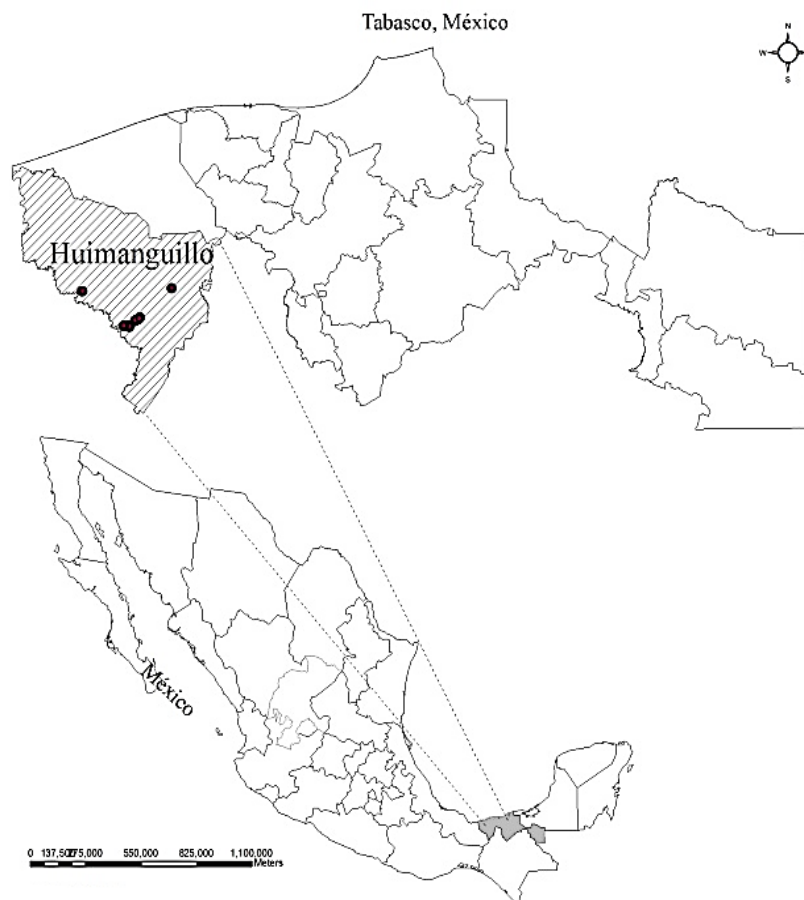


FIGURA 1. Localización de las plantaciones inventariadas de hule en Tabasco, México.

Primera Fase del estudio

Caracterización dasométrica. El inventario forestal se realizó en 11 plantaciones de hule (una plantación de 25 años, 32 años y 34 años; dos plantaciones de 31 años; tres plantaciones de 28 años y 51 años). Se establecieron tres parcelas de 20 m × 20 m por plantación, con 23 árboles en promedio por parcela, haciendo un total de 753 árboles, con un área total inventariada de 13 200 m², de acuerdo con Carrillo (2008).

De todos los árboles de las 33 parcelas con diámetro mayor a 8 cm, se midieron las siguientes variables dasométricas: diámetro normal a 1.30 m (D) con la forcípula; altura de fuste limpio (H_f) y altura total (H) utilizando la pistola Haga. El diámetro mínimo de inventario de 8 cm, se eligió por ser un árbol aprovechable para madera de desintegración (8 cm - 20 cm) para la fabricación de papel y conglomerados; o para puntales (8 cm - 15 cm) y postes (10 cm - 45 cm); para madera para sierra (20 cm - 200 cm), o para madera para desenrollo (15 cm - 160 cm) (Rodríguez, Broto y Lizarralde, 2008; Rondeux, 2010).

En esta primera fase de inventario en campo, se calcularon diámetro medio cuadrático (cm); altura dominante (H_{dom} , m); área basal considerando la sección transversal del tronco del árbol a 1.30 m de altura (g , m²); área basimétrica (G , m² ha⁻¹); número de árboles por hectárea (N) e índice de densidad del rodal (IDR) (en inglés *stand density index SDI*), datos que permiten generar la descripción de cualquier masa monoespecífica (Condés y Martínez-Millán, 2001).

Área basimétrica de la plantación. La medida de densidad más frecuente referida a un rodal o plantación es la suma de la sección de los troncos de los árboles a la altura de pecho, referido a una hectárea de superficie (Domínguez-Domínguez, Bravo y del Río-Gaztelurrutia, 2006; Pérez-González, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi y Etchevers-Barra, 2012).

$$G = \left[\sum_i^n \frac{\pi}{4} * \frac{D^2}{10000} \right] / S$$

Donde:

G = Área basimétrica

D = diámetro normal (cm)

S = tamaño de la parcela (ha)

Densidad de plantaciones de hule. Una medida muy utilizada de la densidad del rodal es el índice de densidad del rodal, para cuyo cálculo se necesita el número de árboles por hectárea y el diámetro medio cuadrático (Dg). El diámetro medio cuadrático se obtiene del área basimétrica y del número de árboles (Gadow, Sánchez y Álvarez, 2007).

$$Dg = \sqrt{\frac{40000}{\pi} * \frac{G}{N}}$$

El IDR es el número de árboles que existen en un rodal comparado con un rodal puro, muy poblado y de edad uniforme con un diámetro medio cuadrático de 25 cm (Domínguez et al., 2006; Pérez-González et al., 2012).

$$IDR = N * \left(\frac{Dg}{25} \right)^{-1.605}$$

Donde:

N = Densidad de arbolado (árb ha⁻¹)

Dg = diámetro medio cuadrático (cm)

Segunda fase del estudio

Selección de árboles "tipo" para cubicar con precisión. En la segunda fase de medición de campo, se seleccionaron los árboles a cubicar. De la población de 743 árboles medidos inicialmente, se seleccionaron 43 árboles, los más cercanos al diámetro medio cuadrático de cada intervalo de clase diamétrica y altura, que fueron considerados una muestra representativa para inventariar en cada calidad de sitio (Tabla 1).

Para realizar la selección de árboles siguiendo los patrones por clase de altura, se aplicó la metodología propuesta por Rojo-Martínez, Martínez-Ruiz y Jasso Mata (2011) de índice de sitio, como variable representativa de la productividad de un área forestal. El modelo elegido se basa en la función anamórfica de Weibull (Bailey, 1980). Los parámetros se calcularon en función de las variables descriptivas de la masa forestal (Condés y Martínez-Millán, (2001), considerando que el tamaño de las parcelas de muestreo está en función de las relaciones entre los coeficientes de variación del número de árboles y del volumen por hectárea. De los árboles seleccionados, 14 fueron árboles dominantes y 29 codominantes. Se determinaron 6 clases de



altura (10-15, 16-20, 21-25, 26-30, 31-35, 36-40 m); asimismo se determinaron 8 clases diamétricas (10-20, 21-30, 31-40, 41-50, 51-60, 61-70, 71-80, 81-90 cm).

Medición de variables dasométricas de árboles en pie.

De los 43 árboles tipo se realizó la medición directa de las variables dasométricas con el Relascopio de Bitterlich: diámetro a inserción de la primera rama (D_i), altura de fuste limpio, altura total, altura comercial (H_c), altura de Pressler (P). Para obtener la altura de Pressler, primero se ubicó el punto de referencia de Pressler o punto directriz (H_p) del árbol, punto en el cual la sección transversal del árbol tiene un diámetro igual a la mitad del diámetro normal. El diámetro normal, se midió con la forcípula. El grosor de la corteza (GC , cm) se midió a 1.30 m de altura con

el medidor de corteza o calibrador Haglof para calcular el volumen maderable sin corteza.

Cubicación de árboles en pie. El volumen de un árbol en pie se determinó en campo por medio del Relascopio de Bitterlich (método de Pressler) (López-Peña, 2005; Romahn de la Vega y Ramírez, 2010; Rondeux, 2010) (Tabla 2). Pressler postula que el volumen del fuste, cualquiera que sea su tipo dendrométrico, es igual a dos tercios del área basal, multiplicada por una altura que Bitterlich denominó altura de Pressler y que es igual a la altura entre la sección transversal a 1.3 m y la sección con diámetro igual a la mitad del diámetro normal, más 1.95 m. Este método cubica el volumen del tronco principal hasta la punta sin incluir las ramas, que son poco aprovechables para la industria.

TABLA1. Distribución de frecuencias de diámetro con corteza y clases de altura total de 43 árboles de *H. brasiliensis* utilizados para el sistema ahusamiento-volumen.

<i>Dg</i> (cm)	Diámetro (cm)	Clases de altura total (m)						Árboles tipo
		10-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	
15.8	10-20	2	2	2	1			7
25.5	21-30	1	3	3	3	1		11
35.4	31-40	1	1	3	3	1	1	10
45.2	41-50			1	2	2		5
55.2	51-60			1	1	1		3
65.2	61-70				1	1	1	3
75.2	71-80				1	1	1	3
85.1	81-90					1		1
Árboles tipo		4	6	10	12	8	3	43

Nota: Dg = diámetro medio cuadrático.

TABLA 2. Ecuaciones alométricas empleadas en estimación maderable de plantaciones de hule.

Nombre	Ecuación	Ecuación exponencial
Berkhout	$V = a + b * D$	
Kopecky	$V = a + b * D^2$	
Hohenadl-Krenn	$V = a + b * D + c * D^2$	
Husch	$\ln V = a + b * \ln(D)$	$V = e^a * D^b$
Spurr	$V = a + b * D^2 * H$	
Stoate	$V = a + b * D^2 + c * D^2 * H + d * H$	
Meyer	$V = a + b * D^2 + c * D * H + d * D^2 * H$	
Schumacher	$\ln V = a + b * \ln(D) + c * \ln(H)$	$V = e^a * D^b * H^c$

Fuente: Monárrez-González y Ramírez-Maldonado, 2003; Segura y Andrade, 2008

Nota: V = volumen de madera (tronco hasta la punta) (m^3 árbol $^{-1}$); D = diámetro normal (cm); H = altura total (m); a, b, c, d = parámetros de regresión del modelo; $\ln$ = logaritmo base e.

Fórmula de Pressler para la cubicación de árboles en pie.

$$V_P = \frac{2}{3} * g * P$$

$$P = H_P + 1.95$$

$$g = \frac{(D)^2}{100} * \frac{\pi}{4}$$

donde:

V_P = volumen de Pressler (m^3 árbol⁻¹)

g = área basal del árbol (m^2)

P = altura de Pressler (m)

H_P = altura del punto de referencia de Pressler (m)*

D = diámetro normal del árbol (cm)

* Equivale a la distancia entre la sección basal y la sección transversal del árbol cuyo diámetro es igual a la mitad del diámetro normal.

A partir del volumen maderable de Pressler (V_P) y del grosor de la corteza se calculó el volumen de madera sin corteza del tronco hasta la punta, a través del factor o coeficiente de forma estimado para esta especie, de acuerdo con Rivas (2006).

Para efectos de validación de las ecuaciones de cubicación se calculó el volumen de madera (tronco hasta la punta) de acuerdo con Monroy y Návar (2004), López-Peña (2005), Romahn de la Vega y Ramírez (2010) y Rojo-Martínez et al. (2011).

Tercera fase del estudio

Análisis estadístico para verificar la normalidad de los datos. Se realizó un análisis estadístico de correlación para observar el grado de asociación entre las variables dasométricas

diámetro a la altura del pecho y altura total en relación con el volumen de Pressler. También se aplicó una prueba de Shapiro–Wilk para ver si la población se encontraba normalmente distribuida y se constató la normalidad del conjunto de datos de las variables dasométricas, como requisito previo a los procesos de modelización. Los datos que no seguían distribuciones normales se modelizaron como de tipo logarítmico, o fueron sometidos a algún tipo de transformación, que se describe posteriormente.

Transformación de algunos modelos alométricos. De las ocho ecuaciones probadas, dos (Husch y Schumacher) se transformaron de su carácter exponencial a lineal, usando logaritmo natural. La transformación de los valores de diámetro y altura a logaritmos, permite el ajuste de una regresión lineal simple por mínimos cuadrados (Tabla 3). Cuando no fue posible linealizar mediante transformaciones, se usaron modelos de regresión no lineal (Segura y Andrade, 2008; Romahn de la Vega y Ramírez, 2010).

Selección del modelo de mejor ajuste a los datos. Para realizar la selección del modelo se consideraron los siguientes criterios: 1) Alto coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajust.) en el análisis de varianza. El coeficiente de determinación (R^2) indica la proporción de la variación total observada en la(s) variable(s) dependiente(s) explicada(s) por el modelo. El coeficiente de determinación ajustado aproximado (*Aproximación de R^2 ajust.*) es una variante del R^2 que generalmente es menor porque pondera el R^2 con el número de observaciones del modelo y del error. 2) Error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error (RCME) que se calcula para buscar el menor valor posible que represente el mayor ajuste del modelo.

TABLA 3. Aplicación y validación de cinco modelos matemáticos para obtención de volumen maderable en plantaciones de hule.

Modelo	Ecuación
Variables combinadas	$V = -0.00336 + 0.00003686 * D^2 * H_c$
Schumacher	$V = 0.02882823 * D^{2.24237} * H_c^{0.74475}$
Australiana	$V = -0.03046 + 0.00017592 * D^2 - 0.000087 * H_c + 0.00002363 * D^2 * H_c$
Variables Combinadas Ponderada	$V = -0.00413 + D^2 * H_c * 0.00003657$
* Lineal Generalizada Ponderada	$V = -0.06399 + 0.009682 * D_{ic} + 0.000026 * D^2 H$

Fuente: *Monroy y Návar, 2004; Rojo-Martínez et al., 2011.

Nota: V = volumen de madera (tronco hasta la punta) (m^3 árbol⁻¹); D = diámetro del árbol a 1.30 m (cm); H_c = altura comercial (m); D_{ic} = diámetro a inserción de la primera rama (m); H = altura total del árbol (m).



Se probaron ocho ecuaciones alométricas genéricas para la estimación de volumen en árboles de hule propuestas por Monárrez-González y Ramírez-Maldonado (2003), y por Segura y Andrade (2008) por su similitud climática y edáfica con el estado de Tabasco y las condiciones de cálculo, similares a las referidas en este estudio, de trabajos realizados en el estado de Veracruz, propuestos por Monroy y Návar (2004) y por Rojo-Martínez *et al.* (2011).

Análisis estadístico para determinar la ecuación de Volumen. La muestra analizada consistió en 43 datos totales, se realizó el procedimiento de aleatorización y agrupación de datos para realizar procesos de modelización de las ecuaciones alométricas de volumen. Luego se procedió a realizar una repartición en 5 grupos aplicando en ellos la validación cruzada. Por lo tanto, se usaron 80% de los datos para los procedimientos de modelización con el programa estadístico SAS institute Inc (2009). Se corrieron los modelos de Berkhout, Kopecky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer y Schumacher a través de regresión lineal y no lineal para determinar el mejor modelo y obtener la ecuación de volumen de fuste en pie.

Validación de los modelos. En los procedimientos de validación de los modelos se utilizaron 20% de los datos para medir la bondad de los ajustes de una forma independiente, a través de los índices para la validación de los modelos (Huang, Yang y Wang, 2003; Domínguez-Domínguez *et al.*, 2006); se estudiaron los errores a través de los parámetros *MRES* (error medio del modelo) y *AMRES* (diferencia absoluta media); también se obtuvo la eficiencia de cada modelo (*EF*) y el coeficiente de determinación ajustado aproximado.

$$MRES = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{n}$$

$$MRES(\%) = 100 \times MRES/\bar{y}$$

$$AMRES = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

$$AMRES(\%) = 100 \times AMRES/\bar{y}$$

Donde:

MRES: Error medio del modelo

AMRES: Diferencia media absoluta

y_i = valor observado o real

$\hat{y}_i$ = Valor estimado con el modelo

n = Número de observaciones en la validación de los modelos

$\bar{y}$ = Valor promedio de los valores observados o reales

Los modelos se validaron aplicando las ecuaciones de eficiencia del modelo que se considera un estimador para evaluar los modelos aplicados con regresiones no lineales (Huang *et al.*, 2003; Gadow *et al.*, 2007; Núñez-López *et al.*, 2013).

$$EF = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde:

y_i = valor observado o real

$\hat{y}_i$ = Valor estimado con el modelo

$\bar{y}$ = Valor promedio de los valores observados o reales

El coeficiente de determinación ajustado no puede ser directamente obtenido en el análisis de varianza de la regresión no lineal, como medida de la bondad de ajuste, por lo que se hace una aproximación de la estimación del coeficiente de determinación ajustado, a través de la diferencia de la suma de cuadrados total y la suma de cuadrados medios de los residuos, para compararlo con la eficiencia del modelo (Domínguez *et al.*, 2006).

$$\text{Aproximación de } R^2_{\text{ajust.}} = \frac{SSC - SSR}{SSC}$$

Donde:

SSC: suma de cuadrado total

SSR: suma de cuadrados medios de los residuos

Además se realizó un análisis de sensibilidad de los modelos para ver la variación del valor predicho a través de la obtención del error relativo.

$$\text{Error relativo}(\%) = 100 \times \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}$$

Cuarta fase del estudio

Validación de los modelos de volumen maderable de Monroy y Návar (2004) y Rojo-Martínez et al. (2011). Se realizó la comparación de los modelos matemáticos propuestos por Monroy y Návar (2004) y Rojo-Martínez et al. (2011) (Tabla 3) para la obtención del volumen de árbol en pie. Es decir se validaron comparando volumen maderable medido y volumen maderable predicho con los modelos usando 100% de los datos. Se aplicó un análisis de regresión lineal al ajuste de ambas variables, utilizando para ello el programa estadístico SAS Institute Inc. (2009). Se generó un criterio de calificación que, de acuerdo con Sakici, Misir, Yavuz y Misir (2008), consistió en jerarquizar cada estadístico de cada modelo asignando valores consecutivos del 1 al 6 en función del orden de importancia: 1 correspondió al mejor valor del estadístico (para el modelo más eficiente y para los errores más bajos *MRES* y *AMRES*) y 6 para el modelo menos eficiente y para los errores más altos. La sumatoria de los valores conformó la calificación total para cada modelo, siendo mejores aquellos con el menor valor en la calificación total. Se ordenaron los modelos de acuerdo con la jerarquización. Se realizó la validación gráfica de los modelos con la representación de los residuos frente a las variables de predicción, analizando su comportamiento.

RESULTADOS

Primera fase del estudio

Información obtenida a través de las encuestas. Los árboles de las plantaciones fueron establecidos a espaciamiento de 6 m × 3 m de manera general. Únicamente dos plantaciones de 28 años de edad alcanzaron mayor densidad, 775 árb ha⁻¹ y 725 árb ha⁻¹; debido a establecimientos de viveros en áreas actualmente plantadas de hule. En el manejo silvícola de las plantaciones inventariadas fueron intercalados cultivos agrícolas como maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus sp.*), piña (*Ananas comosus*) y yuca (*Manihot esculenta*), actividades realizadas durante los tres primeros años. En los árboles plantados se realizaron podas de formación para mantener el fuste libre de ramas hasta 7.40 m de altura, para posteriormente realizar la pica. Los productores que ocuparon sus terrenos para viveros obtenían varetas para la extracción de yemas clonales.

Segunda fase del estudio

Variables dasométricas de árboles en pie. La plantación de 51 años de edad presentó la máxima área basimétrica. Las plantaciones más densas, fueron la de 34 años con 575 árb ha⁻¹ y la de 31 años con 592 árb ha⁻¹.

Tercera fase del estudio

Prueba de normalidad de los datos. La variable de respuesta volumen maderable de Pressler generó promedio de 1.47 m³ árbol⁻¹ ± 1.66 m³ árbol⁻¹, con coeficiente de variación 113.18%. Se presentaron valores mínimos de 0.08 m³ árbol⁻¹ y máximos de 7.93 m³ árbol⁻¹. Los datos de la variable volumen presentaron distribución normal W: 0.75% (Shapiro Wilks).

La desviación estándar es muy grande (el coeficiente de variación tiende a uno). Esta desviación se debe a que se buscaron muestras que representaran toda la variabilidad de tamaños de la población. La tendencia, si bien ha sido establecida por la media, es confiable porque se presentan valores alejados hacia la derecha de la media; las variables fueron estratificadas por clases de diámetro-altura, dentro de un grupo de edades.

Correlación de las variables. Existe alta correlación entre las variables *D* y *H*, como datos observados o medidos en relación con los valores estimados o predichos del volumen maderable de Pressler. Aplicando las pruebas estadísticas de correlación de Pearson, el coeficiente de correlación muestral estimado es alto $r = 0.889$ y significativo ($p < 0.0001$), lo que indica que existe una fuerte asociación entre el volumen maderable de Pressler y el diámetro de los árboles, por lo que se rechaza la hipótesis nula planteada $H_0: \rho = 0$.

Ajuste de los modelos alométricos. De los ocho modelos probados (Berkhout, Kopecky, Hohenadl-Krenn, Husch, Spurr, Stoate, Meyer, Schumacher) para determinar la ecuación de volumen para la especie de hule en Tabasco, el análisis de regresión lineal aplicado demostró que el modelo de Kopecky es estadísticamente diferente, como se muestra en la tabla 4.

En el análisis de varianza se puede observar en cumplimiento de las hipótesis estadísticas $H_0: \beta_1 = 0$ Vs. $H_a: \beta_1 \neq 0$; que el valor calculado de $F = 196.46$, permite rechazar la hipótesis de nulidad H_0 , con un $\alpha = 0.0001$ ($Pr = F$). También se observa el coeficiente de determinación $R^2 = 0.8273$, el modelo explica 82.73% de la variación en el volumen de Pressler.



TABLA 4. Análisis de varianza y parámetros ajustados por regresión lineal para la obtención del Volumen maderable con el modelo de Kopecky.

<i>Fuente</i>	<i>G. L.</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F-Valor</i>	<i>Pr > F</i>
Modelo	1	95.7814	95.7814	196.46	<.0001
Error	41	19.9892	0.4875		
Total corregido	42	115.7707			
$R^2 = 0.8273$		$R^2_{ajust} = 0.8231$	Coef. Var. = 47.5973	DW = 2.195	
<i>Variable</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error estándar</i>	<i>Valor t</i>	<i>Pr > t </i>	<i>Inflación de la varianza</i>
Intercepto	-0.08202	0.1534	-0.53	0.5959	0
Diámetro ²	0.000873	0.00006228	14.02	<.0001	1

Nota: R^2_{ajust} = coeficiente de determinación ajustado

El estadístico de Durbin y Watson (DW) resultó muy similar en los ocho modelos, estando los errores positivamente correlacionados; además, en el factor de incremento de la varianza (VIF), el modelo seleccionado resultó tener VIF máximo menor de diez. Por estas razones, no presenta problemas de colinealidad en las variables (Domínguez-Domínguez *et al.*, 2006). Asimismo se obtuvo un menor valor de coeficiente de variación, lo que significa mayor homogeneidad en los valores de la variable.

Las ecuaciones de Husch y Schumacher (linealizadas) tienen coeficientes de determinación ajustado altos; el resto de ecuaciones (lineales) tienen valores próximos también (Tabla 5). Sin embargo no son equiparables los valores de las ecuaciones linealizadas a los de las ecuaciones no linealizadas. Los valores de eficiencia son muy próximos entre ellos.

Análisis estadístico y selección del mejor modelo. El estudio de residuos estudentizados del modelo de Kopecky del volumen de los árboles, dio como resultado media próxima a uno y varianza cercana a dos (Tabla 6). La desviación estándar fue inferior a la varianza. La distribución de los residuos fue normal ($Pr < W = 0.0001$), aunque mostró cierto grado de influencia de apuntamiento de 4.5% en relación con una distribución normal. Los estadísticos de las variables dasométricas sí representaron dispersión de las observaciones en el test ($Pr < W$), encontrándose que no se cumple este criterio de normalidad de los residuos: se expresan en el gráfico de los valores estimados y

observados. Para esta etapa se demostró que el diámetro promedio, la altura total y el valor predicho o estimado de volumen de Pressler pudieron explicar este porcentaje de la variable dependiente con alta significancia.

El *MRES* y la *AMRES* resultaron aceptables (dentro de $\pm 10\%$ del valor de la media observada a 95% del nivel de significancia), según Huang *et al.* (2003). El *MRES* para el modelo de volumen en pie (0.003%) y *AMRES* (0.474%) resultaron acordes con los valores obtenidos en el coeficiente de determinación ajustado en el análisis de varianza (Tabla 7).

En relación con el *test* de las distancias de Cook (0.125 a 1.125), no se encontraron valores extremos para indicar la influencia de una observación con respecto a un modelo particular. Respecto a la diferencia de ajustes (*Dffits*), no se obtuvieron valores que sobrepasaran en valor absoluto a $|2[(m+1)/n]^{1/2}|$ consideradas influyentes, ya que los puntos presentan valores cercanos a cero, con una varianza homogénea, por lo que los datos tienen buen ajuste (Jiménez, 2001). Únicamente 1.2% de las observaciones presentó puntos influyentes, por lo que se considera que no generó mayor problema. Los gráficos de los residuos para cada modelo ajustado, en relación con el valor estimado de la variable dependiente Volumen de Pressler, permiten apreciar el comportamiento de los modelos (Fig. 2).

TABLA 5. Coeficiente de determinación ajustado y eficiencia de los modelos de volumen maderable en plantaciones de hule.

<i>Modelos</i>	<i>R² ajust</i>	<i>Eficiencia modelo</i>
Kopezky	0.8261	0.74
Spurr	0.8258	0.74
Stoate	0.8405	0.73
Schumacher	0.9063	0.73
Hohenadl-Krenn	0.8279	0.72
Berkhout	0.7933	0.72
Meyer	0.8421	0.72
Husch	0.8838	0.71

TABLA 6. Estudio de los residuos estudentizados del modelo de Kopezky de Volumen maderable de Pressler con 43 datos.

<i>Variable</i>	<i>Media</i>	<i>Varianza</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Curtosis o apuntamiento</i>	<i>Pr < W</i>
Diámetro	37.9930	338.8063	18.4066	0.0605	0.0019
Altura total	26.7906	53.4183	7.3087	-0.4799	0.6480
Volumen de Pressler	1.4669	2.7564	1.6602	4.5309	<0.0001

TABLA 7. Estadística para la validación de los modelos.

<i>Ecuaciones</i>	<i>Eficiencia Modelo</i>		<i>MRES (%)</i>		<i>AMRES (%)</i>		<i>Calificación total</i>
	<i>Valor</i>	<i>Calificación</i>	<i>Valor</i>	<i>Calificación</i>	<i>Valor</i>	<i>Calificación</i>	
Kopezky	0.74	1	-1.01	3	32.84	1	5
Stoate	0.73	3	0.72	2	33.25	2	7
Spurr	0.74	2	-1.41	4	33.39	4	10
Hohenadl-krenn	0.72	7	0.32	1	34.09	6	14
Schumacher	0.73	4	3.41	8	33.37	3	15
Meyer	0.72	6	1.51	6	33.79	5	17
Berkhout	0.72	5	-1.43	5	37.09	9	19
Husch	0.71	8	2.64	7	34.31	7	22

Nota: MRES= Error medio del modelo o sesgo; AMRES= Diferencia media absoluta.

De los ocho modelos, el que presentó mejor eficiencia y mejor coeficiente de determinación ajustado (0.82) en conjunto con MRES y AMRES fue el de Kopezky. El modelo alométrico de volumen de Husch resultó muy bajo en la eficiencia, presentando bajo ajuste.

La ecuación generada de Kopezky quedó como sigue:

$$V = -0.08202 + 0.00087297 * D^2$$

Donde

V: Volumen

D: Diámetro a 1.30 m

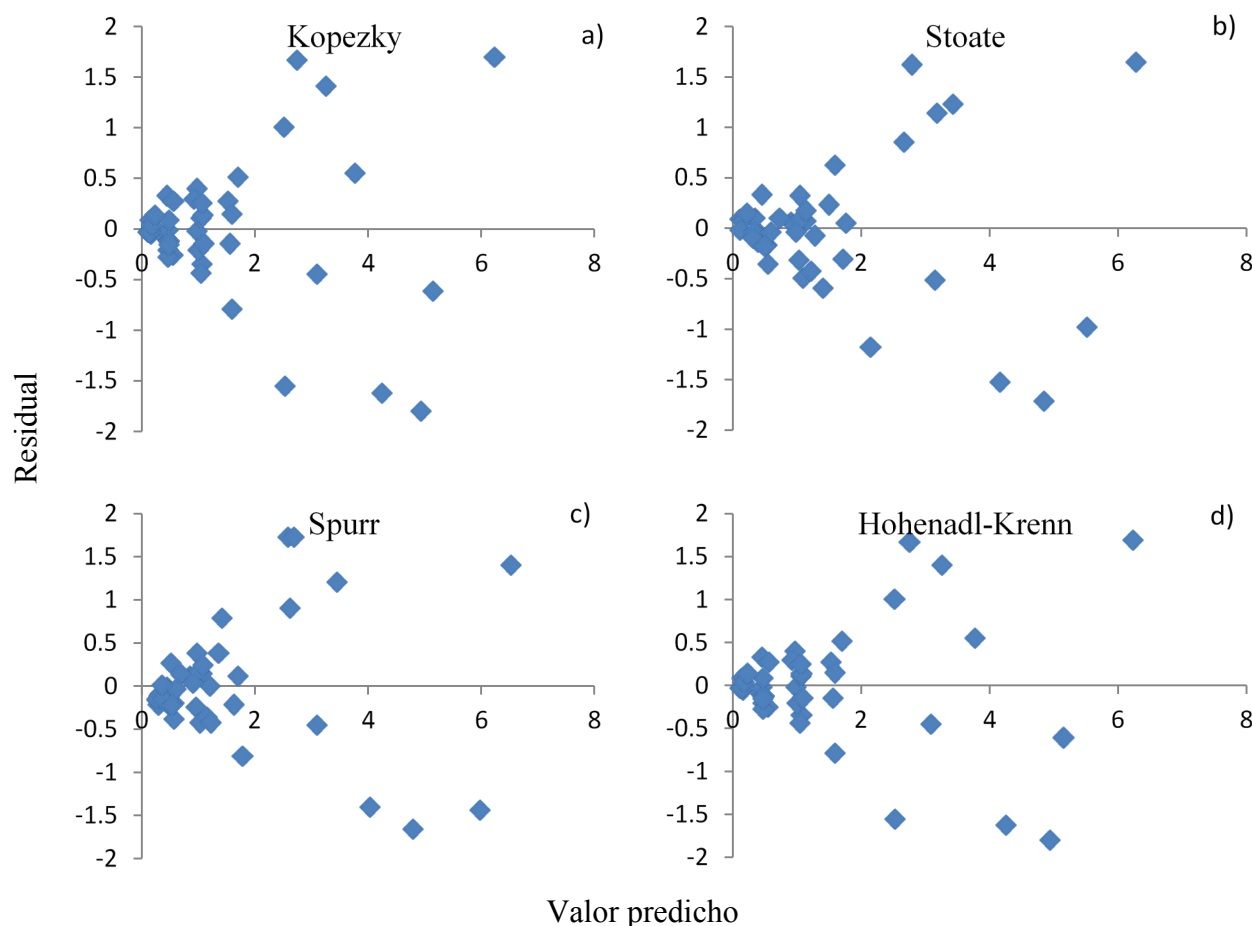


FIGURA 2. Gráfico de los residuos de la estimación del modelo frente al valor predicho o estimado del Volumen maderable.

Comparación de observaciones reales con las estimaciones de los mejores modelos. Los valores predichos y observados en el gráfico de dispersión de volumen se distribuyen en la línea de ajuste, en un nivel de significancia de 95% (Fig. 3). Realizando el análisis de regresión lineal, los modelos de mejor ajuste son Kopezky, Spurr, Stoaate y Hohenadl-krenn. La ecuación de Kopezky presenta equilibrio en el modelo aplicado para el volumen maderable a edades de 25 años a 51 años, con el mejor ajuste entre el valor predicho de volumen y el valor estimado, ajustados a partir de la altura total.

Comparación de los modelos de volumen maderable de Rojo-Martínez et al. (2011), Monroy y Navar (2004) y Kopezky. El *MRES* y la *AMRES* resultaron aceptables (dentro de $\pm 10\%$ del valor de la media observada a 95% del nivel de significancia), según Huang *et al.* (2003), en el caso de la diferencia media absoluta en porcentaje (0.0027% y 0.4739%) que reflejó un valor no muy alto, está en relación con los valores obtenidos en el ajuste de los modelos.

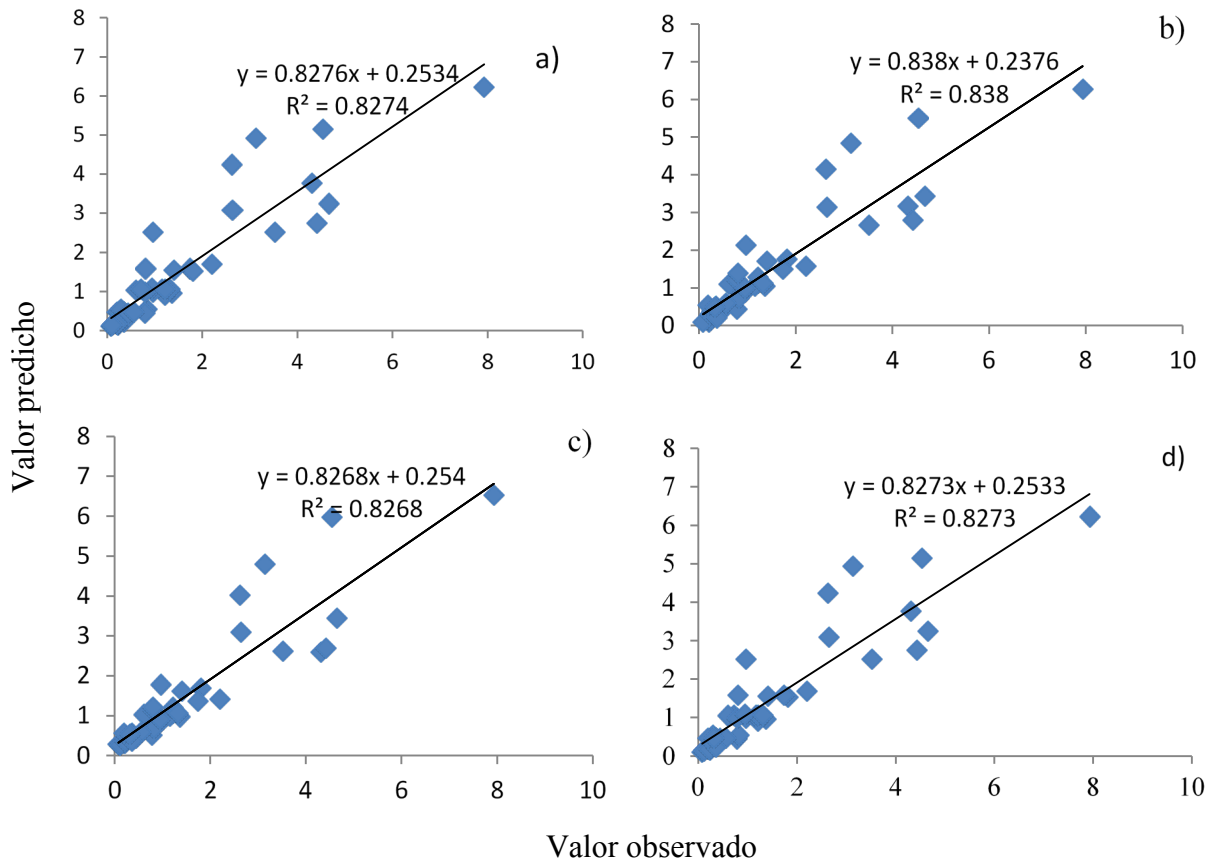


FIGURA 3. Gráficos de dispersión de valor predicho frente al valor observado del volumen maderable de Pressler de los mejores modelos ajustados. a) Kopezky; b) Stoate; c) Spurr d) Hohenadl-krenn.

A continuación, se muestran los valores correspondientes a los parámetros estimados mediante el análisis de regresión de la población de 43 árboles tipo para la validación del modelo, con 100% de los datos, en relación con el modelo de Kopezky, que se obtiene con las variables significativas, el diámetro a 1.30 m de altura, la altura total y la relación volumen maderable de Pressler.

La validación de la ecuación de volumen generada se evaluó comparando con las ecuaciones propuestas por Monroy y Nívar (2004) y Rojo-Martínez *et al.* (2011). Las ecuaciones de Monroy y Nívar (2004) presentaron valores cercanos a 1 y -1, indicando una perfecta relación funcional entre las dos variables, positiva y negativa, respectivamente, con una eficiencia de 77% (Tabla 8). En comparación con la ecuación generada, para ambos casos presentaron una ecuación más equilibrada, calificada por el orden de eficiencia.

Se generó un criterio de calificación que, de acuerdo con Sakici *et al.* (2008), consistió en jerarquizar cada estadístico de cada modelo, asignando valores consecutivos del 1 al 6 en función del orden de importancia (1 correspondió al mejor valor del estadístico y 6 al valor más pobre). Posteriormente, la sumatoria de los valores conformó la calificación total de cada modelo; por comparación se identificaron los mejores modelos, siendo aquellos con el más bajo valor en la calificación total.

En la representación gráfica de residuos de la validación de los modelos matemáticos frente a las variables de predicción propuestas por Monroy y Nívar (2004) y por Rojo-Martínez *et al.* (2011), se aprecia que la ecuación de Kopezky está equilibrada (Fig. 4); la propuesta de Monroy y Nívar tiene un pequeño sesgo negativo: infravalora los volúmenes altos; las restantes ecuaciones tienen un sesgo muy fuerte, con residuos positivos crecientes para los volúmenes mayores.



TABLA 8. Validación de modelos alométricos de volumen de fuste.

Modelo	Eficiencia Modelo		MRES (%)		AMRES (%)		Calificación total
	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	
Monroy y Návar	0.77	3	-12.40	2	31.52	1	6
Kopezky	0.74	5	-1.01	1	32.84	2	8
Schumacher	0.80	1	26.48	4	33.34	3	8
Variable combinada	0.77	2	26.26	3	34.89	4	9
Australiana	0.73	6	33.45	6	36.70	6	18
Variables combinadas ponderadas	0.77	4	26.90	5	35.19	5	14

Nota: MRES= Error medio del modelo o sesgo; AMRES= Diferencia media absoluta.

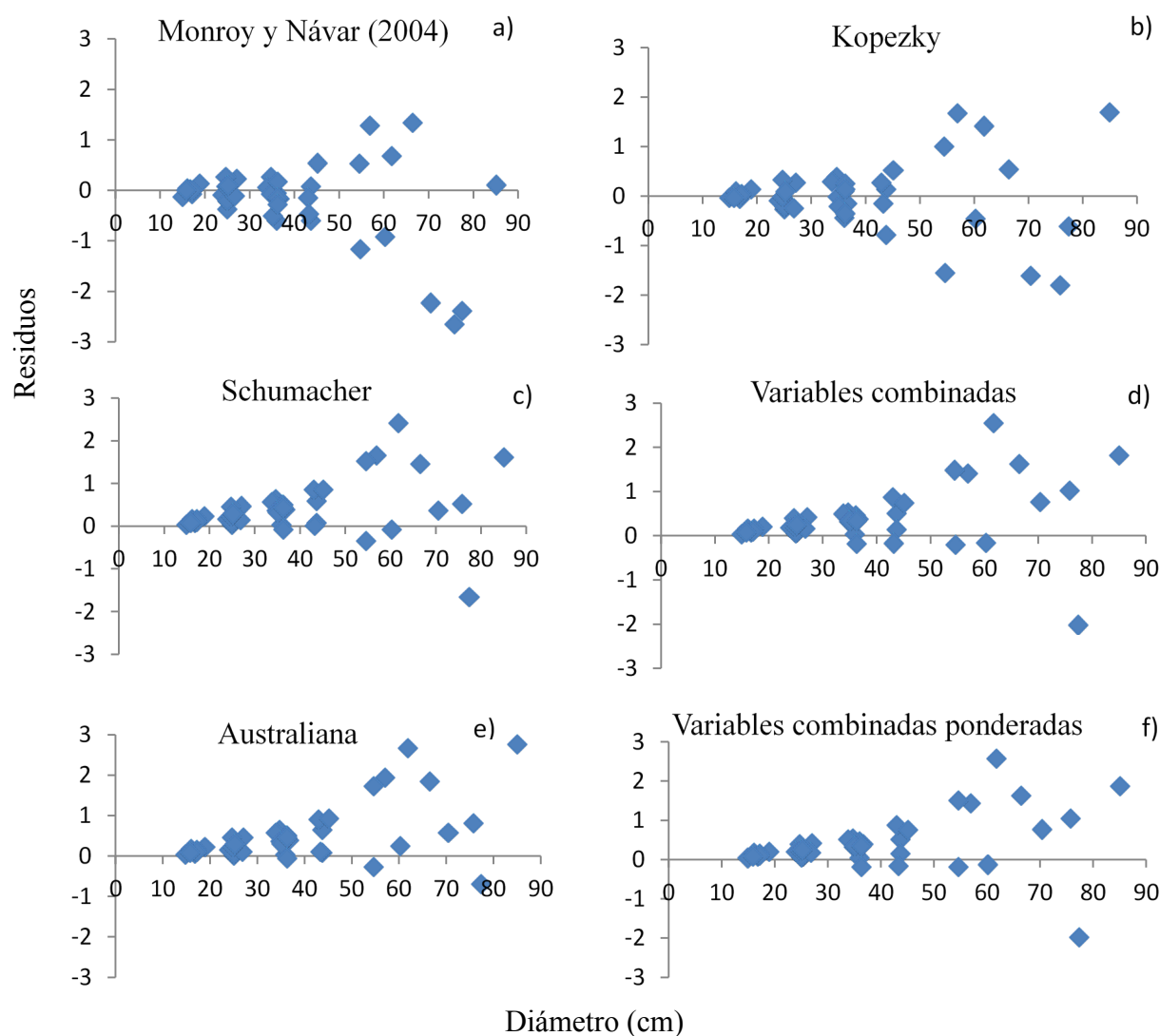


FIGURA 4. Representación gráfica de residuos de la validación los modelos matemáticos propuestos Monroy y Návar (2004), y Rojo-Martínez et al. (2011) y este trabajo, frente a las variables de predicción.

La validación de la ecuación de producción regional de hule estudiada por Monroy y Nívar (2004), probada a partir de la altura total comercial, resultó tener un coeficiente de determinación $R^2 = 0.82$, en contraste con las ecuaciones de Rojo-Martínez *et al.* (2011) que presentaron $R^2 = 0.98$. En relación con las variables observadas, se probó el ajuste de las ecuaciones,

obteniendo resultados de $R^2 = 0.85$ (Fig. 5). Por consiguiente, las ecuaciones de Monroy y Nívar (2004) presentaron valores cercanos a 1 y -1, indicando una perfecta relación funcional entre las dos variables, positiva y negativa, con eficiencia de 77%, ambas ecuaciones presentaron similitud con la ecuación generada en este estudio.

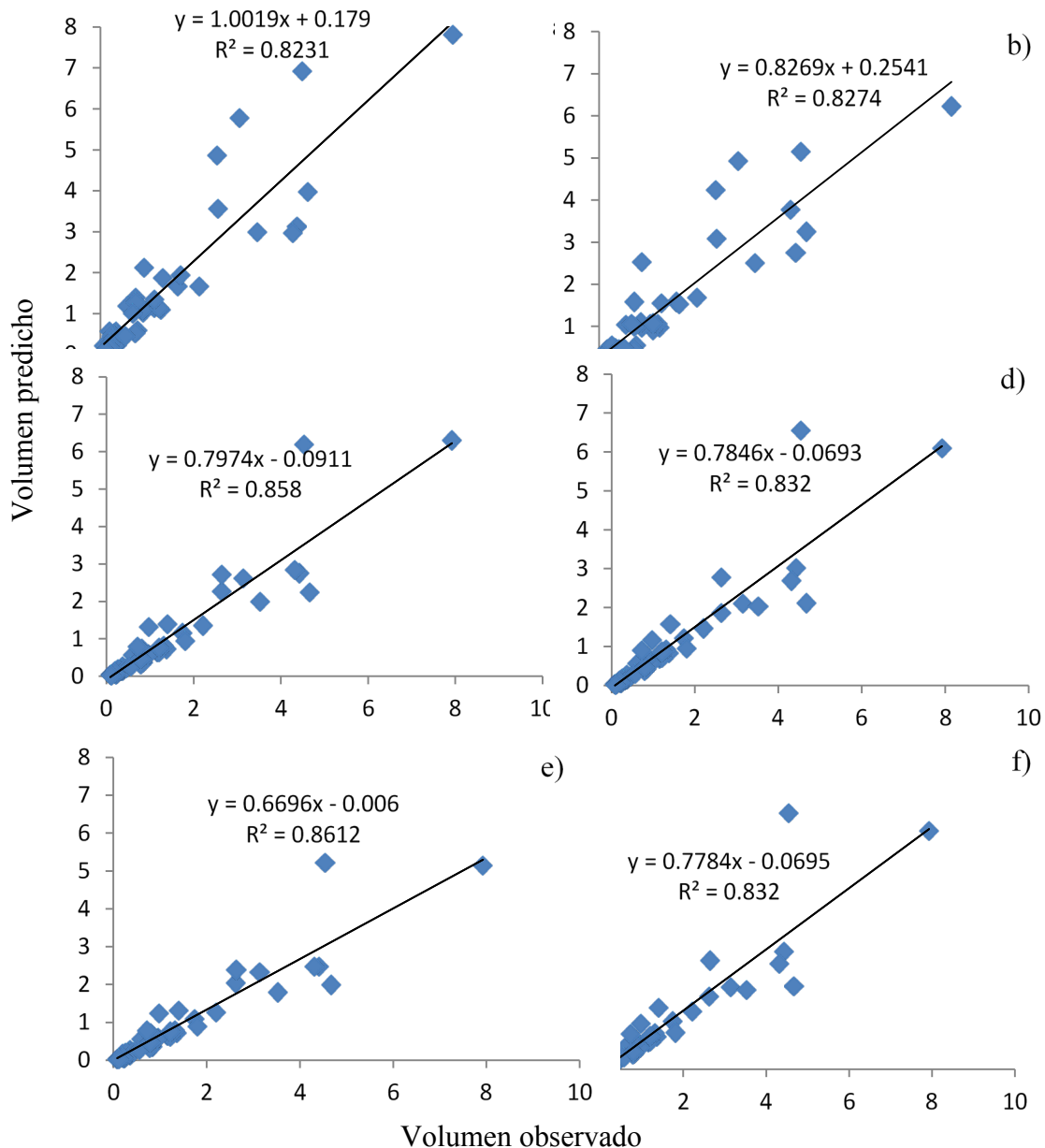


FIGURA 5. Dispersión de valor predicho frente al observado en la validación de modelos de Monroy y Nívar (2004) y Rojo-Martínez *et al.* (2011): a) Monroy y Nívar (2004); b) Kopezky; c) Schumacher; d) variables combinadas; e) Australiana; f) variables combinadas ponderadas.



DISCUSIÓN

El análisis estadístico de los datos a partir del inventario dasométrico de las plantaciones de *Hevea brasiliensis* Müell Arg., permitió generar la ecuación de volumen maderable de esta especie, observándose que existe poca variabilidad en el diámetro normal, altura total, altura comercial, altura de Pressler y volumen maderable de Pressler.

El área basimétrica promedio de las plantaciones de *H. brasiliensis* fue 37.5 m² ha⁻¹ a edad de turno de 25 años, 49.8 m² ha⁻¹ para 28 años, 41.1 m² ha⁻¹ para 31 años, 54.9 m² ha⁻¹ para 32 años, 32.0 m² ha⁻¹ para 34 años y 65.6 m² ha⁻¹ para 51 años. La mayoría de estos resultados superan los valores obtenidos por Monroy *et al.* (2006) con la misma especie y el mismo manejo silvícola, en el estado de Veracruz: 27.2 m² ha⁻¹ a 25 años; 31.8 m² ha⁻¹ a 30 años, 35.8 m² ha⁻¹ a 35 años y 39.5 m² ha⁻¹ a 40 años. Las plantaciones en el municipio de Huimanguillo, Tabasco están en aprovechamiento en edades (años) de 25, 28, 31, 32, 34 y 51, las cuales con buenas prácticas de manejo de cultivos podrían presentar mayor producción maderable.

El diámetro de los árboles en las plantaciones de *H. brasiliensis* en Huimanguillo, Tabasco se vio influenciado por la densidad, sitio y manejo del cultivo; no obstante, los resultados de este estudio concuerdan con los de otros realizados en Tailandia, Indonesia, Malasia, India, China, Vietnam, Costa de Marfil, Sri Lanka, Liberia y Filipinas, donde se ha demostrado que esta especie llega a alcanzar 30 m de altura y 30 cm de diámetro en un periodo de vida económica de más de 30 años (Prabhakaran-Nair, 2010). Además, en la región de origen, cuenca del río Amazonas en Brasil se encuentran alturas de 30 m y diámetros de más de 95 cm (Priyadarshan y Clément-Demange, 2004). En otros estudios con esta misma especie, con manejo silvícola en Tezonapa y Uxpanapa, Veracruz, México, dentro de un intervalo de edad de 8 años a 31 años, se registraron valores de altura media de 15.8 m a 27.6 m (Monroy *et al.*, 2006). Sin embargo, el diámetro de cualquier especie es altamente sensible a los cambios con la densidad, es decir, parámetros de estructura espacial en la plantación de 51 años de edad presentan un grado de diferenciación alta (Gadow *et al.*, 2007). En general, el diámetro crecerá con base en el manejo que se aplique a esta especie, es decir: las características genéticas de los clones, la densidad de plantación, la aplicación de fertilizante, la presencia de

enfermedades, la manera de cosecha del látex (profundidad del corte y frecuencia de pica), entre otros.

En estudios realizados en Kerala y Tamil Nadu, India, se obtuvieron ecuaciones de volumen de árboles a través de modelos de parámetros aleatorios basados en edad y número de árboles por hectárea para cuatro clones: GT1 457.13 m³ ha⁻¹ a 35 años; PB235 247.53 m³ ha⁻¹, 25 años; RR1105 73.32 m³ ha⁻¹ a 24 años; RRIM600 360.88 m³ ha⁻¹ a 31 años; con promedio de 500 árb.ha⁻¹; determinadas con coeficiente de determinación ajustado de 0.87 (Kerala Forest Research Institute, 2006).

En las plantaciones aquí estudiadas, los modelos con mejores ajustes fueron Kopecky, Spurr, Stoate, y Schumacher. El modelo de Kopecky, presentó coeficiente de determinación de 0.82, elegido por orden de eficiencia ponderada con diferencia media absoluta y error medio absoluto. La ecuación es válida para árboles con diámetros entre 10 cm y 85 cm. Este último es menor, comparado con el obtenido en otro estudio en plantaciones de Tezonapa y Uxpanapa, Veracruz, México, donde se encontró $R^2 = 0.90$ (Monroy *et al.*, 2006). El modelo Schumacher es el más usado en las plantaciones de *H. brasiliensis*, sin embargo, en Tabasco el modelo fue menos eficiente; otro modelo usado para esta especie fue Spurr, que ha sido ampliamente utilizado en especies maderables en distintas localidades (Monroy *et al.*, 2006). A excepción de pocos casos, definidos por la ecuación de volumen de variable combinada, los valores de R^2 (predicción) resultaron por debajo de 0.8 para los casos considerados; en general son más pequeños los errores de predicción de los datos de validación del modelo.

En la validación de ecuación de producción regional propuesta por Monroy y Návar (2004), probada a partir de la variable altura total comercial, en contraste con las ecuaciones de Rojo-Martínez *et al.* (2011), para la ecuación de variables combinadas y variables combinadas ponderadas, se obtuvieron coeficiente de determinación $R^2 = 0.83$, Schumacher $R^2 = 0.85$ y Australiana $R^2 = 0.86$, calculados a partir del modelo de índice de sitio a una edad de referencia de 42 años. Por consiguiente, las ecuaciones de Monroy y Návar (2004) presentaron valores cercanos a 1 y -1, los cuales indican una perfecta relación funcional entre las dos variables, positiva y negativa, con una eficiencia de 77%. En comparación con la ecuación generada, para ambos casos presentaron una ecuación más equilibrada,

calificadas por el orden de eficiencia. Sin embargo, la correlación entre variables y las diferencias en el poder de explicación de cada una de estas, ocasiona que solo algunas de las variables independientes tengan una contribución significativa aplicando los modelos de regresión simple; ya que subestiman el volumen maderable de los árboles de hule a partir de la altura comercial; mientras que en el presente trabajo se ha cubicado el árbol hasta un diámetro en punta delgada de 10 cm (Rodríguez et al., 2008; Rondeux, 2010).

CONCLUSIONES

De acuerdo con la modelización, de los ocho modelos matemáticos para predecir el volumen de fuste comercial de *Hevea brasiliensis*, el de la ecuación Kopecky presentó los mejores ajustes para el aprovechamiento maderable dentro de un intervalo de edades entre 25 años y 51 años: 25, 28, 31, 32, 34 y 51. A través del modelo lineal, se eligió por la mejor distribución de valores residuales, considerando la forma del árbol a través del volumen de Pressler. Esta ecuación permite predecir el volumen a partir de su diámetro y será utilizada como un modelo de producción regional para el estado de Tabasco, México.

Las ecuaciones fueron ajustadas con la altura de Pressler, esta ecuación funciona para obtener volúmenes de fuste comercial, es decir con un diámetro en punta delgada de 10 cm. El volumen maderable máximo que presentaron las plantaciones fue 1.88 m³ por árbol y el mínimo volumen maderable 0.54 m³ por árbol.

La ecuación ajustada por Monroy y Nívar (2004) resultó más eficiente que la presentada en este trabajo. Ambas pueden utilizarse para la cubicación de árboles de 21 años a 51 años en el estado de Tabasco: la de Monroy y Nívar exige la medición de la altura, mientras que la ajustada en este trabajo predice el volumen exclusivamente a partir del diámetro normal, por lo que requiere de menos mediciones para su utilización. Las ecuaciones de Rojo-Martínez resultaron menos eficientes y con un sesgo que las hace menos adecuadas para la cubicación de los árboles de hule en Tabasco.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece la beca Conacyt concedida al primer autor para la realización de la maestría en Ciencias y el apoyo económico

otorgado por el Colegio de Postgraduados para realizar el trabajo de campo. Así como también a los productores de hule que permitieron el acceso a sus plantaciones.

REFERENCIAS

- Bailey, R. L. (1980). Individual tree growth derived from diameter distribution models. *Forest Science*, 26, 626-632.
- Bravo, F., Delgado, J. A., Gallardo, J. F., Bravo-Oviedo, A., Ruiz-Peinado, R., Merino, A., Montero, G., Cámara, A., Navarro, R., Ordóñez, C., & Canga, E. (2007). Métodos para cuantificar la fijación de CO₂ en los sistemas forestales. En F. Bravo (Ed.), *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático* (pp. 237-273). España: Fundación Gas Natural.
- Carrillo E., G. (2008). *Casos prácticos para muestreos e inventarios forestales*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Condés, S., & Martínez-Millán, J. (2001). Optimización del tamaño de la parcela de muestreo mediante simulación del inventario forestal. En F. de Borbón (Presidencia), *Tercer Congreso Forestal Español*. Llevado a cabo en Granada, España.
- Domínguez-Domínguez, M., Bravo, F., & del Río-Gaztelurrutia, M. (2006). Modelo de tamaño de copa en *Pinus sylvestris* L., en bosques del centro de España. *Interciencia*, 31(3), 168-175.
- Gadow, K., Sánchez, O., & Álvarez, G. (2007). *Estructura y crecimiento del bosque*. Göttingen, Alemania: Universidad de Göttingen.
- Huang, S., Yang, Y., & Wang, Y. (2003). A critical look at procedures for validating growth and yield models. En A. Amaro, D. Reed, P. Soare y O. Soares (Eds.), *Modelling Forest Systems* (pp. 271-293). Inglaterra: CABI.
- Izquierdo-Bautista, H., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., Velázquez-Martínez, A., & Córdova-Ávalos, V. (2011). Problemática en los procesos de producción de las plantaciones de hule *Hevea brasiliensis* Muell Arg. en Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 513-524.
- Jiménez M., J. A. (2001). Una generalización de la estadística de Cook. *Revista Colombiana de Estadística*, 24(2), 111-120.
- Kerala Forest Research Institute [KFRI] (2006). Calibration of volume prediction equations for different clones of rubber based on random parameter models (N° 294). India.
- López-Peña, C. (2005). Metodología para la elaboración de tarifas de cubicación específicas para cada área o masa forestal objeto de un inventario por muestreo. En R. Vélez (Presidencia), *IV Congreso Forestal Español*. Zaragoza, España.
- Monárrez-González, J. C., & Ramírez-Maldonado, H. (2003). Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus durangensis* Mtz. en el estado de Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 45-56.



- Monroy, R., Aguirre, C., & Jiménez, P. (2006). Productividad maderable de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Ciencia UANL*, 9(3), 261-269.
- Monroy, R., & Nívar, C. (2004). Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de volumen de Hule (*Hevea brasiliensis*) Muell. Arg., en Veracruz, México. *Ciencia Forestal en México*, 29(95), 43-60.
- Nívar, J. (2010). Measurement and assessment methods of forest aboveground biomass: A literature review and the challenges ahead. En M. Benteke y F. Bux (Eds.), *Biomass* (pp. 27-64). Croatia: InTech.
- Nívar, J. (2014). A stand-class growth and yield model for Mexico's northern temperate, mixed and multiaged forests. *Forests*, 5, 3048-3069. doi: 10.3390/f5123048
- Núñez-López, D., Treviño-Garza, E. J., Reyes-Gómez, V. M., Muñoz-Robles, C. A., Aguirre-Calderón, O. A., & Jiménez-Pérez, J. (2013). Spatial interpolation of monthly mean precipitation in the Río Bravo/Grande basin. *Water Technology and Sciences*, 2(4), 185-193.
- Ortiz-Pérez, M. A., Siebe, C., & Cram, S. (2005). Diferenciación ecogeográfica de Tabasco. En J. Bueno, F. Álvarez, & S. Santiago (Eds.), *Biodiversidad del estado de Tabasco* (pp. 305-316). México: Instituto de Biología, UNAM-Conabio.
- Pérez-González, G., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., & Etchevers-Barra, J. (2012). Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 7-24. doi: 10.21829/myb.2012.181511
- Prabhakaran-Nair, K. P. (2010). Rubber (*Hevea brasiliensis*). En K. P. Prabhakaran-Nair (Ed.), *The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World* (pp. 237-273). Londres: Elsevier.
- Priyadarshan, P. M., & Clément-Demange, A. (2004). Breeding *Hevea rubber*: formal and molecular genetics. *Advances in Genetics*, 52, 51-115. doi: 10.1016/S0065-2660(04)52003-5
- Ratnasingham, J. F., Ioras, F., & Wenming, L. (2011). Sustainability of the Rubberwood Sector in Malaysia. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*, 39(2), 305-311. doi: 10.15835/nbha3927195
- Reza, N. H., Hamami S. M., Nobuchi, T., & Suhaimi, B. E. (2011). The effect of growth rate on wood density and anatomical characteristics of Rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) in two different clonal trails. *Journal of Natural Product and Plant Resource*, 1(2), 71-80. Recuperado de <http://www.scholarsresearchlibrary.com/articles/the-effect-of-growth-rate-on-wood-density-and-anatomical-characteristics-of-rubberwood-hevea-brasiliensis-muell-arg-in-tw.pdf>
- Rivas, T. D. (2006). *Sistemas de producción forestal*. México, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Rodríguez, F., Broto, M., & Lizarralde, I. (2008). CubiFOR: Herramienta para cubicar, clasificar productos y calcular biomasa y CO₂ en masas forestales de Castilla y León. *Revista Montes*, 95, 33-39.
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendi, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835-864. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Rojó-Martínez, G. E., Jasso-Mata, J., Vargas Hernández, J., Velázquez-Martínez, A., & Palma López, D. J. (2002). Predicción de la producción de látex en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(3), 183-190.
- Rojó-Martínez, G. E., Martínez-Ruiz, R., & Jasso-Mata, J. (2011). *El cultivo de hule en México*. México: Universidad Autónoma Indígena de México y Colegio de Postgraduados.
- Romahn de la Vega, C. F., & Ramírez, M. H. (2010). *Dendrometría*. México: Universidad Autónoma Chapingo. Recuperado de <http://dicifo.chapingo.mx/licenciatura/publicaciones/dendrometría.pdf>
- Rondeux, J. (2010). *Medición de árboles y masas forestales*. Madrid, España: Editorial Mundi-Prensa.
- Sakici, E. O., Misir, N., Yavuz, H., & Misir, M. (2008). Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. *Journal of Forest Research*, 23(6), 522-533. doi: 10.1080/02827580802552453
- SAS Institute Inc. 2009. Base SAS® (Versión 9.2) Procedure User's Guide. Cary: SAS Institute Inc.
- Segura, M., & Andrade, J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas*, 46, 89-96.
- Servicio Meteorológico Nacional (2018). *Información climatológica de la Estación de Huimanguillo*. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=tab>
- Tapia, J., & Nívar, J. (1998). Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahuesamiento para *Pinus teocote* en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental. *Ciencia e Investigación Forestal*, 12(1), 5-19.
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J. ..., & Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: forest biometric system for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3): 437-455. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.06.040.

Manuscrito recibido el: 29 de mayo de 2015

Aceptado el: 8 de diciembre de 2017

Publicado el: 25 de septiembre de 2018

Este documento se debe citar como:

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), e2421867. doi: 10.21829/myb.2018.2421867



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.