



DOI: [10.29298/rmcf.v16i91.1548](https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i91.1548)

Artículo de investigación

Sistemas de ecuaciones aditivas para inventarios del peso verde de la biomasa aérea de *Brahea dulcis* (Kunth) Mart.

Additive equations systems for inventories of the green weight of *Brahea dulcis* (Kunth) Mart. aboveground biomass

Juan Carlos Tamarit-Urias^{1*}, Adrián Hernández-Ramos², Casimiro Ordóñez-Prado¹, Jonathan Hernández-Ramos³, Enrique Buendía-Rodríguez⁴

Fecha de recepción/Reception date: 21 de enero de 2025.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 23 de julio de 2025.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental San Martinito. México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Saltillo. México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío. México.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: tamarit.juan@inifap.gob.mx

*Corresponding author; e-mail: tamarit.juan@inifap.gob.mx

Resumen

La hoja inmadura y plegada (velilla) de la palma (*Brahea dulcis*) es un importante producto forestal no maderable (PFNM) que aprovechan las comunidades indígenas de zonas semiáridas de Puebla, México. Sin embargo, se carece de herramientas biométricas que cuantifiquen el peso verde de su biomasa. Se desarrollaron sistemas de ecuaciones aditivas (SEA) que estiman el peso verde de la biomasa aérea por componente estructural y total de ejemplares individuales maduros de *B. dulcis*. Mediante un muestreo destructivo, se recolectaron 42 ejemplares; en cada individuo en pie, se midió el diámetro de tallo (DT; cm) a una altura de 20 cm sobre el suelo, la altura total (AT; m) y el diámetro de copa (DC; m). Posteriormente, se derribaron, seccionaron por componente (tallos, peciolas, hojas verdes y velilla), y se registró el respectivo peso verde (PT, PP, PHV y PV; kg); el peso verde total (PVT) por individuo se obtuvo sumando el peso de sus componentes. Se evaluaron cuatro SEA, el modelo base fue la función alométrica potencial $Y = \alpha \cdot X^\beta$; el ajuste se realizó con el método generalizado de momentos. Para el mejor SEA seleccionado ($R^2_{adj} = 0.6919$ y $RCME = 0.8793$ kg para el PVT) las variables predictoras fueron la combinación AT DC, ambas son fáciles de medir. Este SEA permitirá realizar inventarios de velilla para cumplir con la normatividad oficial mexicana; además, es el primero en su tipo que se documenta en la literatura científica especializada para un taxón de palma, importante PFNM, en una zona semiárida.

Palabras clave: Diámetro de copa, modelos alométricos, palma dulce, peso de velilla, producto forestal no maderable, propiedad de aditividad.

Abstract

The immature, folded leaf (spear) of the palm tree (*Brahea dulcis*) is an important non-timber forest product (NTFP) used by indigenous communities in the semi-arid regions of *Puebla*, Mexico. However, there is a lack of biometric tools to quantify the green weight of its biomass. Additive equations systems (AES) were developed to estimate the green weight of aboveground biomass by structural component and the total green weight of *B. dulcis* mature individual specimens. 42 specimens were collected using destructive sampling; for each standing individual, the stem diameter (D ; cm) was measured at a height of 20 cm above the ground; the total height (TH ; m) and the crown diameter (CD ; m) were also measured. The specimens were subsequently felled and separated into components (stem, petioles, green leaves, and spear), and their respective green weights (SW , PW , GLW , and SpW ; kg) were recorded. The total green weight (TGW) per individual was obtained by adding the weights of its components. Four AES were evaluated, using as a base model the potential allometric function $Y=\alpha \cdot X^\beta$; the fit was performed using the generalized method of moments. For the best AES selected ($R^2_{adj}=0.6919$ and $RMSE=0.8793$ kg for TGW), the predictor variables were the combination of $TH \cdot CD$, both of which are easy to measure. This AES will enable spear inventories to be carried out in compliance with the Mexican official regulations; furthermore, it is the first palm taxon, an important NTFP, to be documented in a semi-arid zone in specialized scientific literature.

Keywords: Crown diameter, allometric models, sugar palm, spear weight, non-timber forest product, additivity property.

Introducción

Las palmas pertenecen a la familia Arecaceae, tienen alta importancia cultural ya que por siglos han sido usadas por el ser humano como alimento (fruto y centro del tallo) y para elaborar múltiples productos que complementan tanto la economía familiar, como el autoconsumo; razón por la que se identifica como un producto forestal no maderable (PFNM) fundamental en diferentes ecorregiones del mundo (Abdullah et al., 2020; Goodman et al., 2013; Pérez-Valladares et al., 2022).

En México, se han identificado 20 géneros y 100 especies de palmas, cuyo manejo y aprovechamiento ha sido, principalmente, empírico por parte de diferentes grupos étnicos y comunidades indígenas (Pulido-Silva et al., 2023).

En particular, el taxón *Brahea dulcis* (Kunth) Mart. (palma dulce, palma soyate, palma sombrero o palma blanca) es nativa de México, Guatemala, Honduras y Nicaragua

(Barret et al., 2019). En la República mexicana se distribuye en Chiapas, Coahuila, Colima, Guerrero, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Oaxaca, Puebla, Sinaloa, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas y Veracruz (Pulido-Silva et al., 2023). Crece en ambientes semiáridos, con climas secos y suelos someros calizos, en colinas y al pie de laderas, bajo un gradiente altitudinal de 800 a 1 600 m; puede ser una especie dominante en palmares de porte alto, localmente conocidos como soyacahuiteras, y de porte bajo denominadas manchoneras; también forma parte de matorrales xerofíticos y en asociación con bosques de *Juniperus* sp. y de *Quercus* sp. (Pérez-Valladares et al., 2020; Rangel-Landa et al., 2016).

De esta palma, se utilizan prácticamente todas sus partes aéreas (tallo, peciolos, hojas, brácteas, frutos e inflorescencias) en más de 100 productos diferentes (Pulido & Coronel-Ortega, 2015). Las comunidades indígenas de la región semiárida del estado de Puebla y de otras entidades aprovechan en forma comercial solo las hojas inmaduras y plegadas, conocidas como velillas o cogollos, que se usan para elaborar y vender artesanías, utensilios domésticos (cestería), artículos religiosos y navideños, figuras, etcétera (Aguilar et al., 2005). Por la importancia cultural y socioeconómica que tiene esta especie para las comunidades rurales indígenas de Puebla, es necesario diseñar programas para su manejo técnico y aprovechamiento sustentable en el contexto del marco regulatorio y normativo prevaleciente (Martínez-Pérez et al., 2012; Pérez-Valladares et al., 2020).

El aprovechamiento de las hojas de palma está regulado por la Ley General de Vida Silvestre (Artículo 40) y su Reglamento (Artículo 37), así como por la Norma Oficial Mexicana NOM-006-SEMARNAT-1997 (López-Serrano et al., 2021). Para tal propósito, es requisito elaborar un estudio técnico en forma de un programa de manejo (PM) por predio forestal, en el que, entre otros aspectos, se indique la cantidad de hoja por extraer; el PM debe de ser autorizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Sin embargo, en el estado de Puebla, un aspecto básico que limita el cumplimiento de los principios técnicos para aprovechar la hoja de palma, es la falta de herramientas biométricas para cuantificar el peso de

la hoja (velilla) de *B. dulcis*, las cuales son fundamentales porque permiten realizar inventarios del peso verde de su biomasa mediante el establecimiento de sitios de muestreo, y así determinar las existencias y posibilidades de extracción.

La forma tradicional para estimar el peso de la hoja y velilla consiste en un método destructivo mediante el cual se realiza el pesaje respectivo en algunos ejemplares; y posteriormente por extrapolación, se infiere el valor para el total de las palmas existentes en una determinada superficie.

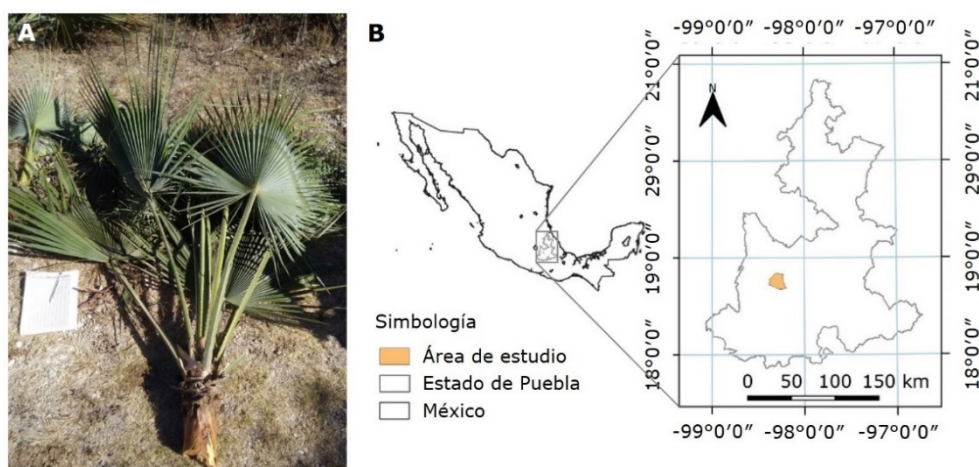
La estrategia lógica para estimar el peso verde de la biomasa aérea por componente estructural (tallo, peciolos, hojas verdes y velilla) y para el total de palmas como *B. dulcis* es mediante el uso de ecuaciones alométricas que conformen un sistema de ecuaciones aditivas (SEA), tal como se hace para árboles, en los que de acuerdo con Bi et al. (2015), Cui et al. (2020), Fu et al. (2016) y Mohan et al. (2020), la propiedad de aditividad se cumple a cabalidad, lo cual significa que la suma de los pesos de la biomasa de los componentes, es igual al peso de la biomasa total. La implicación práctica del SEA es que, posteriormente, en la determinación de la biomasa del taxón bastará con aplicar un método de inventario por muestreo no destructivo; en el cual, el peso estará en función de variables fáciles de medir, como en el caso de las palmas puede ser el diámetro de copa o la altura total del espécimen. Lo anterior es similar a los estudios orientados a determinar la biomasa, la captura de carbono y el secuestro de CO₂ de árboles en el contexto y para hacer frente al cambio climático (Huy et al., 2023; Ordóñez-Prado et al., 2024).

Es importante señalar que solo para los estados de Guerrero y Oaxaca se han generado SEA orientados a realizar inventarios de biomasa aérea verde de *B. dulcis* por componente y total (López-Serrano et al., 2021). Además, también se ha determinado que, entre las palmas arborescentes de América, esta especie tiene la tasa de producción de hojas más alta, con un intervalo de 11 a 15 hojas individuo⁻¹ año⁻¹ (Aguilar et al., 2005; Pulido & Coronel-Ortega, 2015).

Ante el escenario referido, se estableció el objetivo de desarrollar funciones alométricas en forma de sistemas de ecuaciones aditivas para estimar el peso de la biomasa aérea en estado verde, tanto por componente estructural (tallo, peciolo, hojas y velilla) como total de ejemplares individuales con madurez comercial de la palma *Brahea dulcis* en Puebla, México. Los SEA por generar conformarán un conjunto de herramientas biométricas de apoyo para la realización de inventarios y aprovechamiento de este importante PFNM.

Materiales y Métodos

En marzo y abril de 2024 se recolectó una muestra aleatoria de 42 ejemplares de la parte aérea de la palma *Brahea dulcis* (Figura 1A) en la comunidad de Teopantlán, Puebla, México (Figura 1B). Cada espécimen que conformó la muestra cumplió con criterios de estar bien conformado, sano y sin daños; además, su altura total correspondió al intervalo en el que se considera que la palma está madura y con producción de velilla comercial, la cual es de 1.3 m como mínimo. Todos los ejemplares se recolectaron en palmares de porte bajo (manchoneras) que son los sitios donde se realiza la extracción comercial de velilla. El tamaño de muestra fue el mínimo necesario y representativo de la población de palmas en la localidad de estudio. No fue posible obtener más especímenes debido a que los pobladores de la comunidad que aprovechan la velilla tienen la visión y conocimiento etnobiológico y ecológico de conservar sus recursos, por lo que prohíben la corta de individuos de *B. dulcis*; por ello, solo aprobaron que se extrajeran 42 individuos para la determinación del peso verde de la biomasa aérea mediante la generación de SEA.



A = Ejemplar colectado de *Brahea dulcis* (Kunth) Mart.; B = Ubicación del área de estudio en Puebla, México.

Figura 1. Taxón y zona de estudio.

A cada ejemplar de la muestra, con cinta diamétrica marca *Forestry Suppliers*® modelo 283D de 5 m de longitud, se le midió en pie el diámetro de tallo (*DT*) en cm a una altura de 20 cm desde el nivel del suelo. Posteriormente, con un flexómetro marca *Pretul*® modelo PRO-55-MEB-R de 5.5 m de longitud se midió la altura total (*AT*) en m, desde el nivel del suelo hasta el ápice de la hoja más alta. También, con el mismo flexómetro, se realizó la medición del diámetro de copa en las orientaciones norte-sur y este-oeste; después, se calculó el diámetro de copa (*DC*) promedio en m. Para obtener el peso verde que corresponde a la biomasa aérea por componente y total a partir de un método destructivo, los individuos seleccionados se derribaron y seccionaron en sus componentes: tallo, peciolo, hojas verdes y velilla, los cuales, de forma independiente, con una báscula electrónica digital colgante marca *Rhino*® con capacidad de 20 kg, se pesaron (kg) para registrar el peso del tallo (*PT*), de peciolo (*PP*), de las hojas verdes (*PHV*) y de la velilla (*PV*). Por sumatoria del peso verde de los componentes, se obtuvo el peso verde total (*PVT*; kg) por ejemplar.

La recolecta se efectuó en el periodo de secas que se caracterizó por ser atípico, ya que la sequía fue mayor a la promedio registrada para la región. Como el interés central fue predecir el peso fresco, el cual es altamente variable por estación, para considerar esta situación y tener una referencia sobre la condición de humedad de los especímenes, se determinó el contenido de humedad (*CH*) en 39 muestras de velilla; el intervalo del *CH* fluctuó entre 14.7 a 60.0 % (media de 33.6 %).

Con las variables medidas se conformó una base de datos (BD) inicial en Excel, misma que fue auditada mediante inspección de gráficos entre las variables dependientes (*PT*, *PP*, *PHV*, *PV* y *PVT*) vs. las variables predictoras (*DT*, *AT*, *DC*) para observar consistencia y comportamientos gráficos lógicos.

Enseguida, se realizó un proceso de transformación de las variables predictoras originales, el cual con base en Picard et al. (2015) consistió en aplicar a cada una la potencia grado 2 y el logaritmo natural. Posteriormente, tanto las variables originales como las transformaciones se combinaron en forma lógica dual. Además, con base en Han et al. (2020) se realizó una transformación de variables independientes al aplicar funciones de tipo raíz cuadrada, exponencial e inversa, así como sus posibles combinaciones lógicas. Esto hizo posible determinar la mejor variable simple, combinada o transformada que permitió explicar el peso verde de la biomasa aérea por componente estructural y total.

La base de datos final con todas las variables referidas, con base en Picard et al. (2015), se usó para ajustar y evaluar la calidad de ajuste del modelo alométrico potencial no lineal de la forma $Y = \alpha \cdot X^\beta$, donde *Y* es el peso verde de la biomasa aérea, *X* es la variable predictora, α y β son parámetros de regresión. Este modelo fue la base para desarrollar y ajustar diferentes sistemas de ecuaciones aditivas (SEA) de biomasa.

De acuerdo con Fu et al. (2016) y Ordóñez-Prado et al. (2024), la estructura matemática general que se usó como base para evaluar el ajuste de diferentes SEA de biomasa se presenta en las expresiones (1) a (5). El término de error en cada ecuación se consideró con efecto aditivo (Chen et al., 2023), porque al estar correlacionados en

el SEA se logran estimaciones más eficientes y precisas ya que los errores estándar son menores y además por sumatoria se cumple la propiedad de aditividad del sistema.

$$PT = e^{\beta_0} \cdot X^{\beta_1} + \varepsilon_{1i} \quad (1)$$

$$PP = e^{\beta_2} \cdot X^{\beta_3} + \varepsilon_{2i} \quad (2)$$

$$PHV = e^{\beta_4} \cdot X^{\beta_5} + \varepsilon_{3i} \quad (3)$$

$$PV = e^{\beta_6} \cdot X^{\beta_7} + \varepsilon_{4i} \quad (4)$$

$$PVT = e^{\beta_0} \cdot X^{\beta_1} + e^{\beta_2} \cdot X^{\beta_3} + e^{\beta_4} \cdot X^{\beta_5} + e^{\beta_6} \cdot X^{\beta_7} + \varepsilon_{0i} \quad (5)$$

Donde:

PT, PP, PHV, PV y PVT = Corresponden al peso verde en kg de la biomasa aérea de los componentes estructurales tallo, peciolo, hojas verdes, velilla y total, respectivamente

X = Variable predictora simple, compuesta o transformada

β_i = Parámetros por estimar

ε_{ki} = Términos del error aleatorio para la i -ésima ecuación

e = Función exponencial aplicada al parámetro que corresponde al intercepto

Los parámetros de los diferentes SEA se estimaron con el método generalizado de momentos, que de acuerdo con Wang et al. (2018) y Xiong et al. (2023) es una técnica apropiada cuando el tamaño de muestra es reducido; además tales autores,

refieren que esta técnica es flexible y permite superar el fenómeno de heterocedasticidad, así como calcular parámetros eficientes y consistentes, por lo que se obtienen errores estándar robustos y se optimiza la raíz del cuadrado medio del error para cada componente estructural y total; el método también cumple a cabalidad con la propiedad de aditividad.

Para evaluar la calidad de ajuste de los SEA probados y seleccionar al mejor, se consideró la significancia de los parámetros estimados ($p < 0.05$) y los estadísticos de bondad de ajuste (Liu & Yen, 2021): Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y la Raíz del cuadrado medio del error ($RCME$). La corrección de la heterocedasticidad se verificó mediante un análisis gráfico de la distribución de los residuales frente a los predichos del *PVT*.

Se realizó un análisis gráfico de los valores observados vs. predichos para comparar las tendencias gráficas que generan la ecuación resultante para el *PVT* (Xu et al., 2022), lo cual refuerza los criterios para seleccionar al mejor SEA, ya que privilegia al que mejor se sobreponga a la trayectoria que describen los datos observados.

La calidad de desempeño del SEA final seleccionado, se evaluó con base en Cui et al. (2020) mediante el método de validación tipo *LOOCV* (*leave-one-out cross validation*). Para esta validación se usó la misma base de datos (BD), los estadísticos calculados fueron el Error medio absoluto (EMA), el Error medio de predicción (EMP) y el Error medio de predicción porcentual ($EMP\%$), además de la $RCME$ y el R^2_{adj} .

Para lograr la aditividad de la biomasa, tanto los ajustes de los SEA como el proceso de validación se realizaron de manera simultánea y compatible mediante el procedimiento *Model* del paquete estadístico SAS 9.3 (SAS Institute Inc., 2011). La restricción que se impuso en cada SEA para cumplir la aditividad fue que el *PVT* del espécimen de palma es igual a la suma del peso verde de los componentes tallo, peciolo, hojas verdes y velilla (Dong et al., 2020); por lo que los parámetros y ecuaciones de los componentes son los mismos que conforman la expresión del *PVT*.

Resultados y Discusión

Los estadísticos descriptivos básicos que caracterizaron cuantitativamente a la población de la palma *B. dulcis* estudiada en términos de las variables predictoras analizadas (*DT*, *AT*, *DC*) y el peso verde de la biomasa aérea por componente estructural y total se presentan en el Cuadro 1. El aporte porcentual medio por componente estructural al *PVT* de la biomasa a nivel de espécimen individual fue de 47.53 (± 3.87), 9.86 (± 0.91), 30.03 (± 3.16) y 12.58 % (± 1.57) para tallo, peciolo, hojas verdes y velilla, respectivamente.

Cuadro 1. Valores de los estadísticos descriptivos de las variables analizadas del peso verde de la biomasa aérea para 42 ejemplares de palma *Brahea dulcis* (Kunth) Mart.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	DE	CV	Varianza
<i>DT</i> (cm)	4.00	27.00	12.00	4.51	37.58	20.34
<i>AT</i> (m)	0.70	2.64	1.42	0.36	25.24	0.13
<i>DC</i> (m)	0.30	1.80	1.03	0.36	35.19	0.13
<i>PT</i> (kg)	0.14	4.19	1.01	0.84	82.49	0.70
<i>PP</i> (kg)	0.01	0.95	0.21	0.17	81.84	0.03
<i>PHV</i> (kg)	0.12	2.90	0.66	0.52	79.55	0.28
<i>PV</i> (kg)	0.04	1.14	0.27	0.22	81.08	0.05
<i>PVT</i> (kg)	0.21	8.12	2.16	1.58	73.12	2.49

DT = Diámetro de tallo a la altura de 20 cm desde el nivel del suelo; *AT* = Altura total; *DC* = Diámetro de copa; *PT*, *PP*, *PHV*, *PV* y *PVT* = Peso verde de la biomasa del tallo, peciolo, hojas verdes, velilla y peso verde total, respectivamente; *DE* = Desviación estándar; *CV* = Coeficiente de variación.

De un total de 14 SEA evaluados con estructura no lineal, solo cuatro resultaron plausibles y promisorios (Cuadro 2) para estimar el peso verde de biomasa por componente estructural y total a nivel de espécimen. En estos SEA las variables predictoras fueron las variables originales. Los valores de los parámetros y estadísticos de ajuste se muestran en el Cuadro 3. Los comportamientos gráficos de las estimaciones del *PVT* de los cuatro SEA se observan en la Figura 2.

Cuadro 2. Estructura matemática de cuatro sistemas de ecuaciones aditivas (SEA) promisorios para estimar el peso verde de la biomasa aérea por componente estructural y total para la palma *Brahea dulcis* (Kunth) Mart.

SEA	Expresiones matemáticas
S1	$PT = e^{\beta_0} \cdot DT^{\beta_1}$ $PP = e^{\beta_2} \cdot DT^{\beta_3}$ $PHV = e^{\beta_4} \cdot DT^{\beta_5}$ $PV = e^{\beta_6} \cdot DT^{\beta_7}$ $PVT = e^{\beta_0} \cdot DT^{\beta_1} + e^{\beta_2} \cdot DT^{\beta_3} + e^{\beta_4} \cdot DT^{\beta_5} + e^{\beta_6} \cdot DT^{\beta_7}$
S2	$PT = e^{\beta_0} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_1}$ $PP = e^{\beta_2} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_3}$ $PHV = e^{\beta_4} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_5}$ $PV = e^{\beta_6} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_7}$ $PVT = e^{\beta_0} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_1} + e^{\beta_2} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_3} + e^{\beta_4} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_5} + e^{\beta_6} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_7}$
S3	$PT = e^{\beta_0} \cdot (DT^2 \cdot AT)^{\beta_1}$ $PP = e^{\beta_2} \cdot (DT^2 \cdot AT)^{\beta_3}$ $PHV = e^{\beta_4} \cdot (DT^2 \cdot AT)^{\beta_5}$ $PV = e^{\beta_6} \cdot (DT^2 \cdot AT)^{\beta_7}$ $PVT = e^{\beta_0} \cdot (DT^2 \cdot AT)^{\beta_1} + e^{\beta_2} \cdot (DT^2 \cdot AT)^{\beta_3} + e^{\beta_4} \cdot (DT^2 \cdot AT)^{\beta_5} + e^{\beta_6} \cdot (DT^2 \cdot AT)^{\beta_7}$
S4	$PT = e^{\beta_0} \cdot (DT \cdot DC)^{\beta_1}$ $PP = e^{\beta_2} \cdot (DT \cdot DC)^{\beta_3}$ $PHV = e^{\beta_4} \cdot (DT \cdot DC)^{\beta_5}$ $PV = e^{\beta_6} \cdot (DT \cdot DC)^{\beta_7}$ $PVT = e^{\beta_0} \cdot (DT \cdot DC)^{\beta_1} + e^{\beta_2} \cdot (DT \cdot DC)^{\beta_3} + e^{\beta_4} \cdot (DT \cdot DC)^{\beta_5} + e^{\beta_6} \cdot (DT \cdot DC)^{\beta_7}$

SEA = Sistema de ecuaciones aditivas; *PT*, *PP*, *PHV*, *PV* y *PVT* = Peso de la biomasa verde del tallo, peciolo, hojas verdes, velilla y peso verde total, respectivamente; *DT* = Diámetro de tallo; *AT* = Altura total, *DC* = Diámetro de copa; *e* = Función exponencial; β_i = Parámetros de regresión.

Cuadro 3. Valores de los parámetros estimados por el método generalizado de momentos para los cuatro sistemas de ecuaciones aditivas de biomasa y estadísticos de bondad por componente estructural y biomasa aérea total.

SEA	Parámetro	Estimador	EE	Valor-t	$Pr> t $	Ec	RCME*	R^2_{adj} *
S1	β_0	-4.434470	0.5761	-7.70	<0.0001	<i>PT</i>	0.5827	0.5279
	β_1	1.755612	0.2254	7.79	<0.0001	<i>PP</i>	0.0994	0.6775
	β_2	-5.495300	0.6234	-8.82	<0.0001	<i>PHV</i>	0.3745	0.4925
	β_3	1.567078	0.2352	6.66	<0.0001	<i>PV</i>	0.1647	0.4361
	β_4	-4.040990	0.7122	-5.67	<0.0001	<i>PVT</i>	0.9780	0.6193
	β_5	1.441822	0.2785	5.18	<0.0001			
	β_6	-5.154130	0.6054	-8.51	<0.0001			
S2	β_7	1.525077	0.2253	6.77	<0.0001			
	β_0	-0.506030	0.1138	-4.45	<0.0001	<i>PT</i>	0.5685	0.5527
	β_1	1.202718	0.1614	7.45	<0.0001	<i>PP</i>	0.0920	0.7241
	β_2	-2.169090	0.1280	-16.94	<0.0001	<i>PHV</i>	0.3361	0.5862
	β_3	1.350357	0.1675	8.06	<0.0001	<i>PV</i>	0.1540	0.5122
	β_4	-0.933750	0.1299	-7.19	<0.0001	<i>PVT</i>	0.8793	0.6919
	β_5	1.172213	0.2176	5.39	<0.0001			
S3	β_6	-1.775110	0.1320	-13.45	<0.0001			
	β_7	1.114483	0.2123	5.25	<0.0001			
	β_0	-3.258860	0.4344	-7.50	<0.0001	<i>PT</i>	0.5318	0.5965
	β_1	0.603637	0.0772	7.82	<0.0001	<i>PP</i>	0.1097	0.6071
	β_2	-5.086410	0.3939	-12.91	<0.0001	<i>PHV</i>	0.3508	0.5532
	β_3	0.651036	0.0605	10.77	<0.0001	<i>PV</i>	0.1425	0.5743
	β_4	-3.813300	0.4397	-8.67	<0.0001	<i>PVT</i>	0.8682	0.6972
	β_5	0.625400	0.0706	8.85	<0.0001			

S4	β_6	-4.746780	0.4031	-11.78	<0.0001			
	β_7	0.632040	0.0613	10.31	<0.0001			
	β_0	-2.756110	0.3285	-8.39	<0.0001	<i>PT</i>	0.4972	0.6472
	β_1	1.062817	0.1292	8.22	<0.0001	<i>PP</i>	0.0981	0.6858
	β_2	-4.361330	0.4317	-10.10	<0.0001	<i>PHV</i>	0.3471	0.5627
	β_3	1.079883	0.1552	6.96	<0.0001	<i>PV</i>	0.1587	0.4724
	β_4	-2.880890	0.5111	-5.64	<0.0001	<i>PVT</i>	0.8211	0.7292
	β_5	0.952985	0.1944	4.90	<0.0001			
	β_6	-3.599960	0.5170	-6.96	<0.0001			
	β_7	0.888946	0.1990	4.47	<0.0001			

SEA = Sistema de ecuaciones aditivas; *PT*, *PP*, *PHV*, *PV* y *PVT* = Peso verde del tallo, peciolo, hojas verdes, velilla y peso verde total, respectivamente; *EE* = Error estándar; *Ec* = Ecuación; *RCME** = Raíz del cuadrado medio del error de cada ecuación del SEA; $R^2_{adj}*$ = Coeficiente de determinación ajustado de cada ecuación del SEA; β_i = Parámetros de regresión.

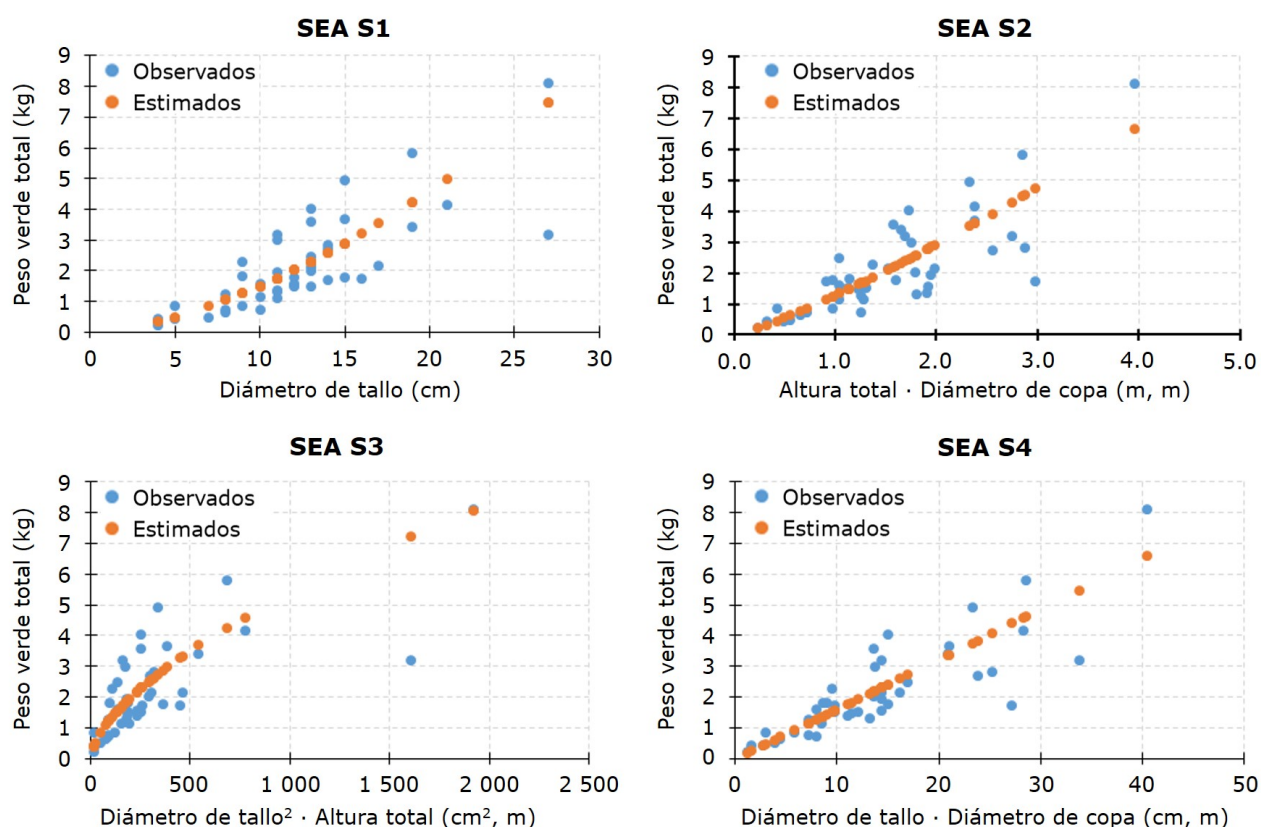
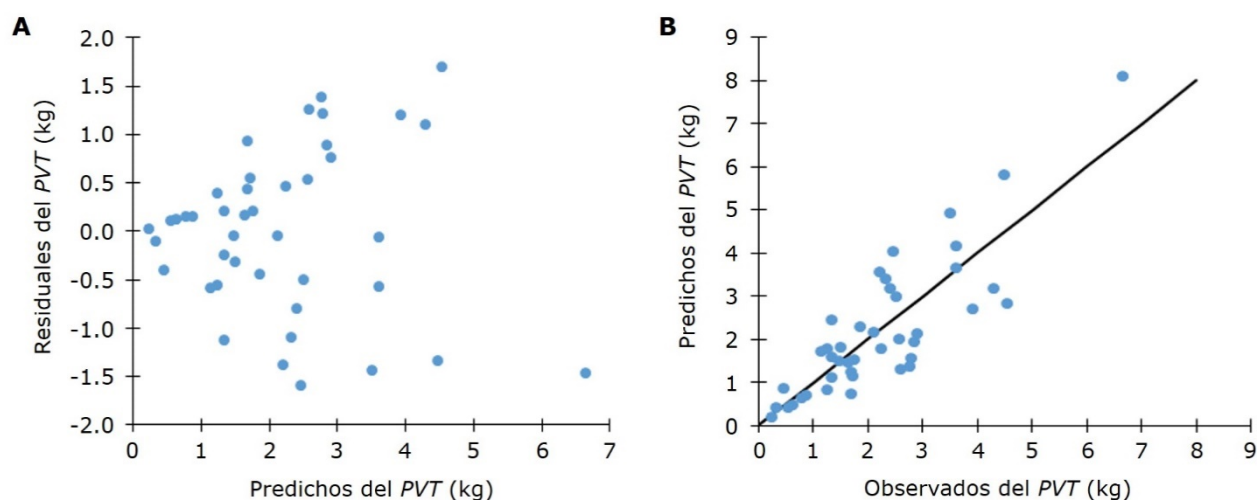


Figura 2. Comportamiento gráfico de las estimaciones del peso de la biomasa aérea verde total por ejemplar vs. los observados para los cuatro sistemas de ecuaciones aditivas de biomasa seleccionados.

Al considerar la significancia de los parámetros, los estadísticos de bondad de ajuste, el comportamiento gráfico de las estimaciones de cada SEA con respecto a los valores observados y la relativa facilidad para medir en campo las variables predictoras por espécimen, se seleccionó al SEA S2. La corrección de la heterocedasticidad de este sistema con el método GMM fue parcial, porque los residuales del *PVT* frente a los valores predichos del *PVT* mostraron una tendencia ligeramente heterocedástica (Figura 3A), lo que también se aprecia en el gráfico de dispersión referente a predichos vs. estimados del *PVT* (Figura 3B). Los valores de los estadísticos producto del proceso de validación tipo *LOOCV* que se aplicó a este SEA se resume en el Cuadro 4.



A = Residuales del PVT vs. predichos del PVT; B = Predichos del PVT vs. observados del PVT.

Figura 3. Verificación de la corrección de la heterocedasticidad.

Cuadro 4. Valores calculados de los estadísticos aplicados al proceso de validación tipo *LOOCV* del SEA S2.

Componente	<i>EMA</i>	<i>EMP</i>	<i>EMP%</i>	<i>RCME</i>	R^2_{adj}
Tallo	0.4849	0.0693	6.69	0.5679	0.5529
Pecíolo	0.0761	0.0027	1.25	0.0919	0.7236
Hojas verdes	0.2859	0.0089	1.34	0.3354	0.5860
Velilla	0.1236	0.0028	1.01	0.1537	0.5121
Peso verde total	0.7861	0.0837	3.82	0.8792	0.6907

EMA = Error medio absoluto; *EMP* = Error medio de predicción; *EMP%* = Error medio de predicción porcentual; *RCME* = Raíz del cuadrado medio del error; R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros.

Con base en los valores medios determinados en $AT=1.4$ m y $DC=1.0$ m (Cuadro 1) se podría asumir que en Puebla *B. dulcis*, comparativamente, es de menor porte que la del

estado de Guerrero, en donde se registran dimensiones promedio en *AT* de 1.9 m y en *DC* de 1.9 m (López-Serrano et al., 2021). Con respecto a la contribución porcentual por componente estructural al peso verde de la biomasa aérea total, lo determinado en el presente estudio coincide en la tendencia con lo observado por López-Serrano et al. (2021), quienes señalan que el tallo aporta la mayor proporción (47.5 % en Puebla y 88.8 % en Guerrero), seguido de las hojas verdes (30.0 % en Puebla y 6.2 % en Guerrero), la velilla contribuye con 12.5 % en Puebla y con 2.0 % en Guerrero.

Los cuatro SEA evaluados presentaron parámetros altamente significativos ($\alpha=0.05$) (Cuadro 3), además de comportamientos eficientes y biológicamente realistas con respecto a los datos observados (Figura 2). La variable independiente *DT* tuvo el menor poder predictivo para el *PVT*. De acuerdo con Goodman et al. (2013) se debe a que las palmas son monocotiledóneas y carecen de crecimiento secundario, por lo que la alometría con el *DT* como predictor podría ser débil; solo puede mejorar cuando se combina con alguna otra variable predictora como la *AT* o el *DC*, como sucede con los SEA S3 y S4, cuyo R^2_{adj} pasa de 61.9 % cuando se usa solo el *DT* al 69.7 y 72.9 % al combinar la *AT* o el *AC*, respectivamente. Sin embargo, medir el *DT* en este taxón se dificulta porque su hábito de crecimiento y reproducción por hijuelos produce una alta densidad de palmas amacolladas en un espacio reducido; por otra parte, se presenta una gran cantidad de hojas secas sujetas al tallo, las cuales deben de removerse para efectuar la medición a 20 cm desde el nivel del suelo, y ello implica una mayor inversión de tiempo para medir cada espécimen cuando se realiza el muestreo para estimar el inventario de biomasa.

El SEA S2 que considera como variable predictora a la combinación *AT·DC* presentó estadísticos de ajuste superiores para el *PP* y *PHV* que los SEA S3 y S4 (Cuadro 3), esta combinación de variables explica el peso de la velilla en 51.2 % y el *PVT* en 69.2 %. Los errores estándar de los parámetros de todos los componentes de biomasa para el SEA S2 son bajos y la precisión para el *PVT* dada por la *RCME* es similar a los SEA S3 y S4, de solo 0.8 kg. En tanto, los valores obtenidos para los estadísticos de la

validación (Cuadro 4) son contundentes para aseverar que el SEA S2 posee una buena capacidad predictiva, por lo que proporciona certidumbre para su uso práctico y operativo. Así, dado que el SEA S2 presentó: (1) Excelentes valores en los estadísticos calculados en la validación, (2) Adecuado comportamiento gráfico de los valores observados vs. estimados para el PVT (Figura 2), y (3) La AT y el DC son más fáciles y rápidos de medir que el DT, se seleccionó para recomendar su uso en la realización de inventarios del peso verde de la biomasa aérea por componente estructural y total en especímenes comerciales de *B. dulcis* en la zona de estudio.

Para *B. dulcis* que crece en el estado de Guerrero, López-Serrano et al. (2021) generaron un SEA linealizado para el mismo propósito que el SEA S2 del presente estudio, la AT y el DC fueron las variables predictoras en forma separada, con $R^2_{adj}=76.1$ para el PVT. También, aplicaron un ajuste simultáneo para lograr la aditividad del peso verde, propiedad que de acuerdo con Huy et al. (2023) y Xu et al. (2022) permite obtener estimaciones biológicamente consistentes sin que se genere sesgo al escalar la estimación del peso final a nivel de superficie.

Respecto a las palmas de porte arbóreo de bosque natural tropical o plantación, se han desarrollado ecuaciones de biomasa aérea total sin estimar la biomasa que aporta cada componente estructural y por lo tanto no generan sistemas de ecuaciones aditivas de biomasa; algunos ejemplos son: *Astrocaryum murumuru* Mart., *Attalea phalerata* Mart. ex Spreng., *Bactris gasipaes* Kunth, *Iriartea deltoidea* Ruiz & Pav., *Mauritia flexuosa* L. f., *Mauritiella aculeata* (Kunth) Burret, *Prestoea montana* (Graham) G. Nicholson y *Socratea exorrhiza* (Mart.) H. Wendl. (Goodman et al., 2013), *Elaeis guineensis* Jacq. (Ramos-Escalante et al., 2018), *Areca catechu* L. (Das et al., 2021), *Oenocarpus bataua* Mart. y *Euterpe precatoria* Mart. (Falen et al., 2023) y *Raphia laurentii* De Wild. (Bocko et al., 2023).

En contraste, el conjunto de ecuaciones alométricas aditivas por componente estructural y total desarrolladas en el presente estudio, son las primeras en su tipo que se documentan en la literatura científica especializada, específicas para un taxón

de palma de tipo arbustivo y en una zona ecológica semiárida, cuyo propósito principal es cuantificar las existencias en términos del peso verde de la biomasa aérea para el aprovechamiento comercial de hojas inmaduras (velilla) como un PFNM. El SEA generado permitirá realizar estimaciones del peso verde de la velilla para cumplir con la normativa y regulación forestal federal vigente.

En futuros estudios sobre ecuaciones aditivas para estimar el peso verde de *Brahea dulcis*, el tamaño de muestra tiene que ser mayor y la recolecta se debe realizar en diferentes épocas del año, con la finalidad de tener más representatividad. Además, es importante evitar que la recolecta de los especímenes coincida con sequías intensas o prolongadas; asimismo es necesario determinar el contenido de humedad promedio y el respectivo intervalo de contenido de humedad de la muestra de palmas que se recolecte y procese.

Conclusiones

A partir de la evaluación de cuatro sistemas de ecuaciones aditivas no lineales para estimar el peso verde de la biomasa aérea por componente estructural (tallo, peciolo, hojas y velilla) y total para ejemplares comerciales individuales de *Brahea dulcis* procedentes del estado de Puebla, México, el sistema seleccionado: $PVT = e^{\beta_0} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_1} + e^{\beta_2} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_3} + e^{\beta_4} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_5} + e^{\beta_6} \cdot (AT \cdot DC)^{\beta_7}$ (RCME de 0.879 kg en el PVT) es parsimonioso y utiliza como variable predictora a la altura total por el diámetro de copa, ambas expresadas en metros y fáciles de medir. Su aplicación contribuirá a que se cumpla la normativa vigente para la realización de inventarios de velilla y el respectivo aprovechamiento de este importante producto forestal no maderable de zonas semiáridas.

Agradecimientos

A la comunidad indígena Teopantlán de Puebla, México por permitir la recolecta de ejemplares de la palma *Brahea dulcis* y al Ing. Lucas Solís Cazares por coordinar el trabajo de campo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés. Juan Carlos Tamarit-Urias declara no haber participado en el proceso editorial del manuscrito.

Contribución por autor

Juan Carlos Tamarit-Urias: conceptualización y organización de la investigación, conformación de bases de datos, análisis estadístico, escritura del documento; Adrián Hernández-Ramos y Casimiro Ordóñez-Prado: elaboración de imágenes y gráficas para la conformación de figuras, interpretación de resultados y revisión del documento; Jonathan Hernández-Ramos y Enrique Buendía-Rodríguez: aporte de literatura especializada y revisión del documento. Todos los autores participaron en la corrección del documento.

Referencias

Abdullah, S. M. K., Pieroni, A., ul Haq, Z., & Ahmad, Z. (2020). Mazri (*Nannorrhops ritchiana* (Griff) Aitch.): a remarkable source of manufacturing traditional handicrafts,

goods and utensils in Pakistan. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 16, Article 45. <https://doi.org/10.1186/s13002-020-00394-0>

Aguilar, J., Illsley, C., Acosta, J., Gómez, T., Tlacotempa, A., Flores, Á., Flores, J., Miranda, E., Sazoxoteco, D., y Teyuco, E. (2005). Palma soyate: tejiendo el tiempo. En C. López, S. Chanfón y G. Segura (Eds.), *La riqueza de los bosques mexicanos más allá de la madera: experiencias de comunidades rurales* (pp. 16-23). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Centro para la Investigación Forestal Internacional. https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BLopez0501S0.pdf

Barrett, C. F., Sinn, B. T., King, L. T., Medina, J. C., Bacon, C. D., Lahmeyer, S. C., & Hodel, D. R. (2019). Phylogenomics, biogeography and evolution in the American genus *Brahea* (Arecaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 190(3), 242-259. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boz015>

Bi, H., Murphy, S., Volkova, L., Weston, C., Fairman, T., Li, Y., Law, R., Norris, J., Lei, X., & Caccamo, G. (2015). Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in south-eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 349, 106-121. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.007>

Bocko, Y. E., Panzou, G. J. L., Dargie, G. C., Mampouya, Y. E. W., Mbemba, M., Loumeto, J. J., & Lewis, S. L. (2023). Allometric equation for *Raphia Laurentii* De Wild, the commonest palm in the Central Congo peatlands. *PLoS One*, 18(4), Article e0273591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273591>

Chen, X., Xie, D., Zhang, Z., Sharma, R. P., Chen, Q., Liu, Q., & Fu, L. (2023). Compatible biomass model with measurement error using airborne LiDAR data. *Remote Sensing*, 15(14), 3546. <https://doi.org/10.3390/rs15143546>

Cui, Y., Bi, H., Liu, S., Hou, G., Wang, N., Ma, X., Zhao, D., Wang, S., & Yun, H. (2020). Developing additive systems of biomass equations for *Robinia pseudoacacia* L. in the region of loess plateau of Western Shanxi Province, China. *Forests*, 11(12), Article 1332. <https://doi.org/10.3390/f11121332>

- Das, M., Nath, P. C., Sileshi, G. W., Pandey, R., Nath, A. J., & Das, A. K. (2021). Biomass models for estimating carbon storage in *Areca* palm plantations. *Environmental and Sustainability Indicators*, 10, Article 100115. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100115>
- Dong, L., Zhang, Y., Zhang, Z., Xie, L., & Li, F. (2020). Comparison of tree biomass modeling approaches for Larch (*Larix olgensis* Henry) trees in Northeast China. *Forests*, 11(2), 202. <https://doi.org/10.3390/f11020202>
- Falen, L., Guedes, M., de Castilho, C. V., Jorge, R. F., Bezerra, F. M., & Magnusson, W. E. (2023). Palm live aboveground biomass in the riparian zones of a forest in Central Amazonia. *Biotropica*, 55(3), 639-649. <https://doi.org/10.1111/btp.13215>
- Fu, L., Lei, Y., Wang, G., Bi, H., Tang, S., & Song, X. (2016). Comparison of seemingly unrelated regressions with error-in-variable models for developing a system of nonlinear additive biomass equations. *Trees*, 30, 839-857. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1325-x>
- Goodman, R. C., Phillips, O. L., del Castillo-Torres, D., Freitas, L., Tapia-Cortese, S., Monteagudo, A., & Baker, T. R. (2013). Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, 310, 994-1004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.045>
- Han, Z., Jin, W., Li, L., Wang, X., Bai, X., & Wang, H. (2020). Nonlinear regression color correction method for RGBN cameras. *IEEE Access*, 8, 25914-25926. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971423>
- Huy, B., Khiem, N. Q., Truong, N. Q., Poudel, K. P., & Temesgen, H. (2023). Additive modeling systems to simultaneously predict aboveground biomass and carbon for *Litsea glutinosa* of agroforestry model in tropical highlands. *Forest Systems*, 32(1), Article e006. <https://doi.org/10.5424/fs/2023321-19780>
- Liu, Y.-H., & Yen, T.-M. (2021). Assessing aboveground carbon storage capacity in bamboo plantations with various species related to its affecting factors across Taiwan. *Forest Ecology and Management*, 481, Article 118745. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118745>

- López-Serrano, P. M., Hernández-Ramos, A., Méndez-González, J., Martínez-Salvador, M., Aguirre-Calderón, O., Vargas-Larreta, B., y Corral-Rivas, J. J. (2021). *Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa de Brahea dulcis en el estado de Oaxaca y Guerrero* (Proyecto: 2017-4-292674, Conafor-Conacyt). Comisión Nacional Forestal y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/708768/Mejores_practicas_de_Brahea_dulcis__Versi_n_2_.pdf
- Martínez-Pérez, A., López, P. A., Gil-Muñoz, A., y Cuevas-Sánchez, J. A. (2012). Plantas silvestres útiles y prioritarias identificadas en la Mixteca Poblana, México. *Acta Botánica Mexicana*, 98, 73-98. <https://doi.org/10.21829/abm98.2012.1141>
- Mohan, K. C., Mason, E. G., Bown, H. E., & Jones, G. (2020). A comparison between traditional ordinary least-squares regression and three methods for enforcing additivity in biomass equations using a sample of *Pinus radiata* trees. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 50, Article 7. <https://doi.org/10.33494/nzjfs502020x90x>
- Ordóñez-Prado, C., Tamarit-Urias, J. C., Nava-Nava, A., & Rodríguez-Acosta, M. (2024). Additive equations system to estimate aboveground biomass by structural component and total of three giant Bamboo species in Mexico. *Cerne*, 30, Article e-103267. <https://doi.org/10.1590/01047760202430013267>
- Pérez-Valladares, C. X., Moreno-Calles, A. I., Casas, A., Rangel-Landa, S., Blancas, J., Caballero, J., & Velazquez, A. (2020). Ecological, cultural, and geographical implications of *Brahea dulcis* (Kunth) Mart. insights for sustainable management in Mexico. *Sustainability*, 12(1), Article 412. <https://doi.org/10.3390/su12010412>
- Pérez-Valladares, C. X., Moreno-Calles, A. I., Mas, J. F., & Velazquez, A. (2022). Species distribution modeling as an approach to studying the processes of landscape domestication in central southern Mexico. *Landscape Ecology*, 37, 461-476. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01365-w>

- Picard, N., Rutishauser, E., Ploton, P., Ngomanda, A., & Henry, M. (2015). Should tree biomass allometry be restricted to power models? *Forest Ecology and Management*, 353, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.035>
- Pulido, M. T., & Coronel-Ortega, M. (2015). Ethnoecology of the palm *Brahea dulcis* (Kunth) Mart. in central Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11, Article 1. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-11-1>
- Pulido-Silva, M. T., Quero, H., Hodel, D., & Lopez-Toledo, L. (2023). Richness, endemism and floristic affinities of the palms of Mexico. *The Botanical Review*, 89, 250-274. <https://doi.org/10.1007/s12229-022-09284-4>
- Ramos-Escalante, G., Ley de-Coss, A., Arce-Espino, C., Escobar-España, J. C., Raj-Aryal, D., Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., y Guerra-Medina, C. E. (2018). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, 52(5), 671-683. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1696/1696>
- Rangel-Landa, S., Casas, A., Rivera-Lozoya, E., Torres-García, I., & Vallejo-Ramos, M. (2016). Ixcatec ethnoecology: plant management and biocultural heritage in Oaxaca, Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 12, Article 30. <https://doi.org/10.1186/s13002-016-0101-3>
- SAS Institute Inc. (2011). *SAS/STAT 9.3 User's Guide*. SAS Institute Inc. <https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/stat/930/>
- Wang, J., Zhang, L., & Feng, Z. (2018). Allometric equations for the aboveground biomass of five tree species in China using the generalized method of moments. *The Forestry Chronicle*, 94(3), 214-220. <https://pubs.cif-ifc.org/doi/abs/10.5558/tfc2018-034>
- Xiong, N., Qiao, Y., Ren, H., Zhang, L., Chen, R., & Wang, J. (2023). Comparison of parameter estimation methods based on two additive biomass models with small samples. *Forests*, 14(8), Article 1655. <https://doi.org/10.3390/f14081655>
- Xu, Z., Du, W., Zhou, G., Qin, L., Meng, S., Yu, J., Sun, Z., SiQing, B., & Liu, Q. (2022). Aboveground biomass allocation and additive allometric models of fifteen tree species

in northeast China based on improved investigation methods. *Forest Ecology and Management*, 505, Article 119918. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119918>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.