

APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS NO LINEALES PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORRAJERA DE *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray

APPLICATION OF NON-LINEAR MATHEMATICAL MODELS FOR THE ESTIMATION OF FORAGE BIOMASS OF *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray

Jairo Mora-Delgado^{1*}, Vilma A. Holguín²

¹Zootecnista, M.Sc, Doctor en Agricultura Tropical, Profesor Titular; ²Zootecnista, M.Sc, Doctor en Ciencias Agrarias, Profesora Asistente, Grupo de Investigación Sistemas Agroforestales Pecuarios, Departamento de Producción Pecuaria. Universidad del Tolima, código postal 7300006299, Ibagué - Colombia; *Autor para correspondencia: e-mail: jrmora@ut.edu.co; vholguin@ut.edu.co

Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cien. 21(1): 43-50, Enero- Junio, 2018
<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.661>

RESUMEN

La determinación de la biomasa forrajera de los arbustos, generalmente, se realiza con métodos destructivos, por ello, la predicción de la biomasa con métodos no destructivos representa una herramienta para los finqueros e investigadores agropecuarios, lo cual, justifica este estudio, dado el ahorro de tiempo y de recursos en los procesos de planificación del recurso forrajero. La construcción de ecuaciones alométricas es una metodología para la estimación de la biomasa de especies leñosas; estos procedimientos son útiles para los investigadores de los recursos agroforestales. El objetivo de este estudio fue formular una ecuación para estimar la biomasa de arbustos de *Tithonia diversifolia*, usando mediciones lineales; se analizaron estadísticamente, a través de coeficientes de correlación de Pearson, mediante los cuales, se seleccionaron las variables más correlacionadas con la biomasa. El trabajo de campo fue realizado desde noviembre hasta diciembre de 2013, en el Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia - CEUNP, Palmira, en un área experimental de 880m, con diseño de surcos cada 2m y distancia entre plantas de 1m, para un total de 440 plantas. El volumen de dosel fue estimado mediante la medición de la altura y dos diámetros, para ser incluidos en una fórmula modificada del volumen básico de un elipsoide. La ecuación de Mitcherlich tuvo el mejor ajuste, siendo el modelo $\bar{Y} = 15,06 (1-1,06)^{-0,12X}$, el que mejor predice la biomasa forrajera.

Palabras clave: Bancos de forraje, predicción, arbustos, modelos matemáticos. <https://agclass.nal.usda.gov/mtwdk.exe>

SUMMARY

Determination of the forage biomass of the bushes is usually done with destructive methods, therefore the prediction of biomass with non-destructive methods represents a tool for farmers and agricultural researchers, which justifies this study, given the saving of time and resources in the planning processes of forage resources. The construction of allometrics equations is a methodology for estimating the biomass of woody species; these procedures are useful for researchers of agroforestry resources. The objective of this study was to generate an equation to estimate the biomass of a shrub, *Tithonia diversifolia*, using linear measurements; which were statistically analyzed by Pearson correlation coefficients, through which the variables most correlated with the biomass were selected. The work field was conducted from November to December 2013 at the Experimental Center of the National University of Colombia - CEUNP, Palmira, in an experimental area of 880 m, with row design every 2 m and distance between plants of 1 m, for a total of 440 plants. The canopy volume was estimated by measuring the height and two diameters to be included in a modified formula of the basic volume of an ellipsoid. A Mitcherlich equation had the best fit, under the model $\bar{Y} = 15,06 (1-1,06)^{-0,12X}$. This equation was the best predictor of biomass for this species.

Key words: Fodder bank, prediction, shrubs, mathematical models. <https://agclass.nal.usda.gov/mtwdk.exe>

INTRODUCCIÓN

La alometría es el estudio del tamaño y sus consecuencias (Gould, 1966), es decir, las proporciones entre las medidas

lineales de las plantas y las medidas de área o volumen obedecen a una regla que es la misma para todas las poblaciones que viven en las mismas condiciones. Dichas medidas morfométricas están relacionadas entre ellas, generando relaciones alométricas que hacen que el desarrollo de una se pueda expresar proporcionalmente con el desarrollo de otras partes del organismo (Mora-Delgado, 2018). Esta relación, se deriva del desarrollo ontogenético de los individuos, que es el mismo para todos, excepto la variabilidad asociada con la historia personal de cada uno; este es el principio básico de la alometría, que predice una medida de un atributo basado en otra medida (Picard *et al.* 2012). Esta relación expresa proporcionalidad entre los aumentos relativos de las medidas (Huxley, 1924; Gayon, 2000). En este orden, una ecuación alométrica es una fórmula que formaliza esta relación cuantitativamente.

Varios investigadores han hecho reportes sobre modelos alométricos para predecir biomasa aérea en especies leñosas, como los reportados por Segura & Andrade (2008) e Iglesias & Barchuk (2010); unos pocos están dedicados a formular ecuaciones para predecir biomasa forrajera de especies usadas en el trópico americano, entre ellos, los más relevantes, son los estudios con *Morus alba* (Armand, 1994), *Acacia pennatula* y *Guazuma ulmifolia* (López-Merlin *et al.* 2003) y *Cercidium floridum* Benth. Ex A. Gray, en el subtropico mexicano (Guillén *et al.* 2007); sin embargo, solo se encontró un reporte específico con *T. diversifolia*, realizado en Cuba, en el cual, se hizo un seguimiento durante dos años para describir, mediante diferentes criterios estadísticos, el comportamiento de algunos componentes morfológicos de esta especie y determinar los modelos de crecimiento de mejor bondad de ajuste (Ruiz *et al.* 2012). El estudio concluye que la información obtenida sugiere un camino para investigaciones futuras, relacionadas con la producción de biomasa.

Tithonia diversifolia es una asterácea arbustiva utilizado como forraje para el ganado, sea en pastoreo o para corte y acarreo, por lo cual, la predicción de su desarrollo constituye un conocimiento práctico, para la toma de decisiones. Ciertas etapas del desarrollo de las especies animales y vegetales se han modelado exitosamente con ecuaciones exponenciales o lineales, que tienen la habilidad de imitar importantes procesos físicos, químicos o biológicos y describir cómo y porqué resulta una respuesta particular; la mayoría de los modelos de crecimiento de cultivos caen dentro de esta categoría de ecuaciones (Santiago-García, 2016; Gálvez *et al.* 2010). Así, el cálculo del crecimiento la biomasa producida por el arbusto representa una información útil para el planificador agropecuario. Tal cálculo podría ser estimado a partir de otras medidas lineales del arbusto, para poder predecir la producción de biomasa, sin tener que cosecharla. Algunas ecuaciones determinísticas han sido usadas para estimar biomasa y, a partir de ella, calcular el volumen de carbono capturado en un sistema forestal o para una especie específica (Riofrío *et al.* 2013).

Las mediciones de la altura de los arbustos relacionadas con el área de dosel, se pueden usar en la estimación del volumen de biomasa aérea, proveyendo así una herramienta práctica para describir la producción de biomasa de los arbustos. En este sentido, Thorne *et al.* (2002) evaluaron una técnica para estimar el volumen (V) del dosel de arbustos, usando la fórmula $V = 2/3 \pi H (A/2 \times B/2)$ (siendo H, la altura total del arbusto y, A y B, los diámetros mayor y menor de la elipse, que forma la proyección de la copa del arbusto), derivada de la fórmula básica del volumen elipsoidal. En la figura 1, se hace una interpretación gráfica de esta fórmula en una imagen de *T. diversifolia*, donde los diámetros se representan con D_1 y D_2 y la altura por H.

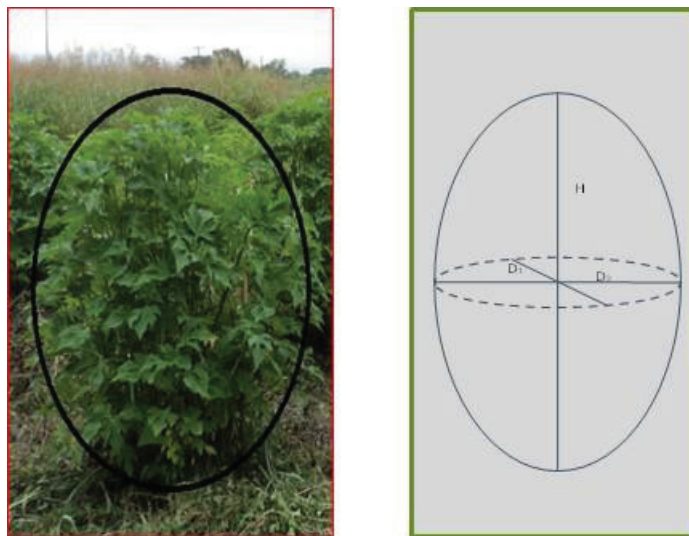


Figura 1. Representación gráfica de la forma elipsoidal del dosel de *Tithonia diversifolia*.

Antes, otros autores habían usado fórmulas matemáticamente equivalentes, para estimar volumen de dosel. Algunos de ellos, usaron la fórmula del volumen rectangular $V = (H \times W \times L)$, siendo H, la altura; W, el ancho y L, el largo (Uresk *et al.* 1977) y también la de un cilindro elíptico ($V = \pi (H) [\text{eje mayor}/2 \times \text{eje menor}/2]$), siendo H, nuevamente la altura; esta fórmula fue usada para estimar volumen de dosel de diferentes especies de arbustos (Lyon, 1968; Peek, 1970; Wambolt *et al.* 1994); sin embargo, estas fórmulas suelen brindar grandes errores en el cálculo del volumen de dosel, porque presentan, usualmente, formas esféricas y elipsoidales, por lo tanto, la fórmula de volumen rectangular suele sobreestimar el volumen; en el mismo sentido, la forma cilíndrica elíptica no integra distancias radiales cambiantes a lo largo de los ejes verticales de las plantas (Thorne *et al.* 2002). Por otra parte, la fórmula de volumen cónico, $V = (\pi r^2 H) / 3$, en la cual, r es el radio y H, la altura del arbusto (Bryant & Kothmann, 1979), puede subestimar el volumen de dosel. Predecir la biomasa con mecanismos no destructivos constituye una ayuda para los manejadores de fincas e investigadores agropecuarios y justifica esta investigación, dado el ahorro de tiempo y de recursos, en los procesos de investigación y productivos. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue producir una ecuación confiable para estimar la biomasa de las plantas de *Tithonia diversifolia*, de forma no destructiva, usando mediciones del dosel como variables independientes, para generar una ecuación alométrica, con el fin de proporcionar un método rápido, para estimar la biomasa forrajera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio, se llevó a cabo usando la base de datos de monitoreo de un cultivar de *T. diversifolia*, de la colección del programa de Hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. La misma fue establecida en octubre de 2012, con materiales provenientes de 43 localidades del sur occidente de Colombia (Valle del Cauca, Caldas, Quindío, Risaralda y Tolima), mediante siembra de cangres de 60cm de largo cada uno, a una densidad de 1m de distancia entre sitios, 2m entre surcos y cinco sitios por cada introducción (10 plantas). Se hizo un corte de uniformización a los 4 meses, podando a 40cm todas las plantas. El área experimental tuvo una superficie de 880m², en un diseño de surcos cada 2m y distancia entre plantas de 1m, para un total de 440 unidades experimentales. El cultivo estaba establecido en un lote de la finca experimental de la Universidad Nacional de Colombia - CEUNP-Palmira; 24°C, 1.000m s.n.m., precipitación anual 1.020mm y humedad relativa 72%, en el municipio de Palmira, Colombia; con una estación seca de julio a agosto, pertenece a la zona climática cálido-moderada de la formación Bosque Seco Tropical (BS-T), con predominio de suelos vertisoles (*epiaquert ustico*) (Acosta *et al.* 1997).

De noviembre a diciembre de 2013, se muestrearon 30 arbustos de *T. diversifolia* en etapa de pre-floración. Para ello, se hizo una cosecha de biomasa (hojas más tallos menores a 1cm de diámetro) cada 60 días, durante el periodo experimental. Para poder correlacionar las medidas lineales del dosel con el peso de la biomasa, se hicieron sucesivos cortes del forraje. Así, se tomó el promedio de todos los cortes manuales de la copa completa a 40cm del suelo, pesando, cada vez, con una balanza portátil digital, marca MC® China. Este procedimiento permitió obtener la biomasa fresca de cada planta, la cual, fue secada en una estufa de secado Binder® serie FD 53, a 120°C, por 24 horas, para obtener la biomasa de materia seca (MS).

Los componentes del volumen del dosel, se midieron tomando lecturas de la altura y de dos diámetros al 50% de la altura de *T. diversifolia*. La altura del dosel (m), se determinó midiendo desde el suelo hasta la rama más alta de material vegetal fotosintéticamente activo. Se tomó la medida del área del dosel, mediante dos diámetros del área de la copa, definida como la extensión más amplia de material vegetal fotosintéticamente activo, que intersecta un plano que pasa horizontalmente, a través de la planta, al 50% de la altura de la planta; se tomaron perpendicularmente en ángulo recto el uno al otro. Cada diámetro, se dividió entre dos para desarrollar la ecuación y estimar el área de una elipse, siendo $AD = \pi (D_1 / 2 \times D_2 / 2)$ [Ecu. 1], donde, D₁ y D₂ son los diámetros. El volumen del dosel (VolE), se estimó aplicando las mediciones de altura y 2 diámetros, a una modificación de la fórmula básica del volumen elipsoidal $VolE = 2/3 \pi HD (D_1 / 2 \times D_2 / 2)$ [Ecu. 2], donde, HD es la altura del dosel y, D₁ y D₂ son los dos diámetros perpendiculares.

A esta fórmula, se le realizó una modificación para ajustarla, con base en una estimación del valor de la densidad de dosel, con lo cual, se propone trabajar con la fórmula modificada: $VolEA = DD (2/3 \pi HD (D_1 / 2 \times D_2 / 2))$ [Ecu. 3], donde, DD es densidad del dosel. Dicha densidad del dosel, se estimó cualitativamente, mediante la clasificación visual de la copa de los arbustos y mediante una calificación del grado de oclusión. Para eso, se estimó la densidad del dosel con una tarjeta de transparencia de follaje de USDA Forest Service (2010), así, DD se usó como factor de ponderación en la fórmula del volumen de dosel.

Las variables más correlacionadas con la biomasa fueron seleccionadas, utilizando coeficientes de correlación de Pearson (R). La producción de biomasa, se estimó mediante las ecuaciones de los modelos Lineal ($\hat{y} = \alpha + \beta X$); Potencial ($\hat{y} = \alpha X^\beta$); Polinómico ($\hat{y} = -\alpha + \beta X - \gamma X^2$); Monomolecular ($\hat{y} = \alpha(1-\beta)^{-\gamma X}$); donde, \hat{y} es la variable de respuesta y, α , β y γ , los parámetros a determinar, mediante el desarrollo de las anteriores ecuaciones. Los datos fueron corridos en el software Infostat (Di Rienzo *et al.* 2008). Estos modelos, se

compararon en función de los valores de R y los estadísticos Bayesiano (BIC) y Akaike (AIC), siendo las ecuaciones con mejor ajuste aquellos que presentan menores valores en estos parámetros (Sakamoto *et al.* 1986). En sentido jerárquico, se consideró el menor valor del criterio de Akaike (AIC), el menor valor de raíz media del cuadrado del error (RMSE) y el mayor coeficiente de determinación (R^2) (Riofrío *et al.* 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medidas lineales y sus derivados tienen una variación importante, comprensible en el caso de una colección de material genético de diferente origen. La variabilidad también se refleja en la dispersión de los valores expresados en los promedios, valores mínimos y máximos de los datos paramétricos, como se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Estadística descriptiva parámetros lineales morfométricos y sus combinaciones en *Tithonia diversifolia*.

Variable	n	Promedio	DE*	Mín	Máx
Biomasa, BF (kg)	40	5,86	2,95	0,6	11,88
Materia Seca, MS (kg)	40	2,11	1,03	0,21	4,38
Volumen Ajustado, VolEA (m ³)	40	5,05	2,67	0,62	11,95
Ramas, LR (m)	40	1,24	0,47	0,23	2,2
Altura, HD (m)	40	2,08	0,43	1,34	2,9
Área, AD (m ²)	40	3,65	1,39	0,99	6,87
Densidad de Dosel, DD (%)	40	0,95	0,11	0,6	1
Volumen, VolE (m ³)	40	5,32	2,85	0,88	13,27

DE: Desviación Estándar.

Las matrices de correlación (Tabla 2) indican que el volumen ajustado y la biomasa son los parámetros más interesantes para construir ecuaciones de regresión y de pre-

dicciones de la biomasa forrajera, dado el alto coeficiente de Pearson, que indica una alta asociación entre estas dos variables.

Tabla 2. Coeficiente de correlación de Pearson entre variables, medidas en plantas de *Tithonia diversifolia*.

	Ramas	Altura	Área	Volumen Aj.	Biomasa	Materia seca
Ramas (LR)	1,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Altura (HD)	0,65	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Área (AD)	0,42	0,68	1,00	0,00	0,00	0,00
Volumen Aj. (VolEA)	0,48	0,83	0,94	1,00	0,00	0,00
Biomasa (BF)	0,51	0,70	0,86	<u>0,89</u>	1,00	0,00
Materia seca (MS)	0,50	0,63	0,72	0,79	0,91	1,00

Una vez corridos los datos en ecuaciones de regresión no lineal y lineal, se encontró que los modelos polinómico y monomolecular tuvieron el mayor ajuste; sin embargo, entre estos dos, el modelo $\bar{Y} = 15,06 (1-1,06)^{-0,12X}$ es el que mejor predice la biomasa, dado que los estadísticos AIC y BIC sugieren que este es el que presenta mejor bondad de ajuste. Como se puede ver en la tabla 3, los modelos lineal y

potencial fueron los que presentaron menor ajuste, aunque el R^2 (0,80), sugiere una alta predecibilidad de la biomasa forrajera, mediante la medición del volumen estimado, a partir de la medición de la altura de dosel, dos diámetros perpendiculares y un factor de ajuste dado por la densidad de dosel.

Tabla 3. Ecuaciones y estimadores estadísticos derivados del análisis de regresión no lineal entre el volumen ajustado, para predecir la biomasa de dosel de *Tithonia diversifolia*.

Modelo	Parámetros	P valor	CME	AIC	BIC
Lineal $\hat{y} = \alpha + \beta X$	$\alpha = 0,89$ $\beta = 0,98$	0,0611 0,0001	1,96	141,34	146,41
Potencial $\hat{y} = \alpha X^\beta$	$\alpha = 1,01$ $\beta = 0,11$	>0,9999 >0,9999	1,99	145,08	150,15
Polinómico $\hat{y} = -\alpha + \beta X - \gamma X^2$	$\alpha = 0,4$ $\beta = 1,56$ $\gamma = 0,05$	0,6260 <0,0001 0,0659	1,70	139,64	146,39
Monomolecular (Mitcherlich) $\hat{y} = \alpha(1-\beta)^{-\gamma X}$	$\alpha = 15,06$ $\beta = 1,06$ $\gamma = 0,12$	<0,0009 0,0001 0,0458	1,68	139,08	145,83

En la figura 2, se representa la curva de regresión no lineal, en la cual, se puede observar los resultados de la modelación, donde se puede detallar que los valores estimados de biomasa están muy cerca de los valores observados. El coeficiente R^2 indicó que las estimaciones tenían una precisión del 80%; es notoria una ligera disminución de la pendiente, a media que aumenta el volumen.

Si bien, hay varios reportes sobre modelos alométricos para predecir biomasa aérea, son escasos los estudios dedicados

a formular ecuaciones para predecir biomasa forrajera. Aunque no se han reportado modelos específicos para predecir la producción de biomasa forrajera de *T. diversifolia*, en Cuba, se hizo un estudio durante dos años, en condiciones de secano, para describir, mediante diferentes criterios estadísticos, el comportamiento de algunos componentes morfológicos de esta especie y determinar los modelos de mejor bondad de ajuste; el estudio concluye, que la información obtenida abre un camino para investigaciones futuras, relacionadas con la producción de biomasa (Ruiz *et al.* 2012).

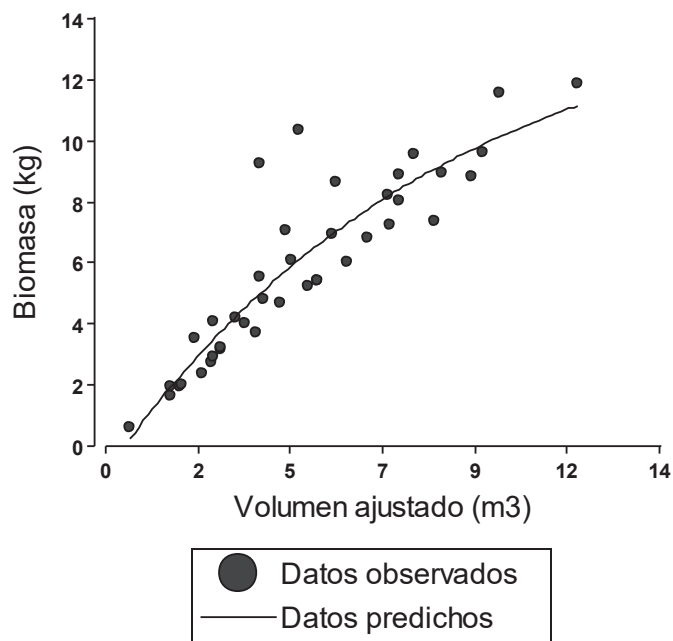


Figura 2. Representación gráfica de la curva generada con el modelo monomolecular (Mitcherlich).

Este estudio reporta el comportamiento del peso total en 1m lineal de la planta, representado con mejor ajuste en un modelo ajustado ($R^2 = 0,83$), que explicó el aumento de esta variable hasta las 18 semanas, con un incremento quincenal promedio fue de 216,38g.

En otras especies, se han reportado modelos alométricos para predecir el volumen y la biomasa y por extensión; estas ecuaciones constituyen la base para estimar carbono almacenado en agroforestales (Segura & Andrade, 2008). Así, Iglesias & Barchuk (2010) reportaron modelos de regresión para estimar la biomasa aérea total de seis especies arbustivas y arbóreas de la familia Fabaceae, nativas del Chaco Árido. Estos modelos incluyeron distintas combinaciones del diámetro a la base (DAB) y la altura de los individuos. Todos ellos predijeron aceptablemente la biomasa por especie, si bien el de regresión lineal que utiliza el DAB, como variable independiente, presentó el mejor ajuste.

Armand (1994) utilizó el volumen del dosel para estimar la biomasa de *Chamaecyflis proliferus*, *Gleditsia friacanthos*, *Medicago arborea*, *Robinia pseudoacacia* y *Morus alba*, obteniendo una ecuación de alta predictibilidad ($MSE = 0,64 (VOL)^{0,884}$), donde MSE es materia seca, con una buena correlación ($R = 0,96$). Esta ecuación sirvió, por muchos años, para generar medidas de biomasa, ya que se basa en parámetros fácilmente medibles y porque es un indicador rápido y confiable para estimar la fitomasa de las especies arbóreas (Etienne, 1989).

Por su parte, Guillén *et al.* (2007) obtuvieron ecuaciones de predicción de la producción de forraje de *Cercidium floridum* Benth. Ex A. Gray, en el desierto de Sonora (México), en mediciones durante dos años consecutivos; este estudio, se basó en la medición de altura de la planta, diámetro de tallo, diámetro mayor de la corona, diámetro menor de la corona y volumen. Como variables dependientes, se cuantificaron el peso seco de las hojas, peso seco de los tallos y peso seco total. Los modelos obtenidos fueron elegidos con base en los coeficientes de determinación (R^2) más altos y al valor del error estándar (EE). La ecuación que mejor estimó el peso seco total estuvo mejor definida por las variables diámetro mayor de la corona, volumen y altura.

Por otra parte, mediciones de diámetro a altura de pecho (DAP) fueron suficientes para estimar la biomasa aérea de especies forrajeras, como *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala*. El estudio de Gómez-Castro *et al.* (2010) estima el almacenamiento de carbono de *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala*, a partir de la cuantificación de biomasa aérea (BA), fraccionada en biomasa de tallo, de ramas y de follaje; a su vez, las mediciones de diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total del árbol y los pesos de tronco, ramas y follaje, se ajustaron a una serie de modelos exponen-

ciales y logarítmicos, predictores de la biomasa aérea (BA). Para el caso de *L. leucocephala*, el modelo de mejor ajuste tuvo fue $LN(BA) = -1,46 + 1,69 LN(DAP)$ y para *G. sepium*, el modelo $BA = 3,27e^{0,075(DAP)}$.

Esto contrasta con lo encontrado en nuestro estudio, en el cual, la biomasa aérea total seca fue determinada a partir de la medición del volumen de dosel, estimado mediante el producto de la altura del dosel por los dos diámetros, divididos entre dos y multiplicados por π .

En síntesis, se sabe que la tendencia es a buscar ecuaciones predictoras específicas para las diferentes especies, por lo que este trabajo constituye un aporte de a la predicción de la biomasa de *T. diversifolia*. En este sentido, este estudio cumple con una función básica de la alometría, que radica en predecir una medida de un atributo basado en otra medida (Picard *et al.* 2012).

Este trabajo constituye un avance en el uso de una ecuación alométrica, basada en mediciones lineales, que permite facilitar la estimación de la biomasa de especies arbustivas, para evitar técnicas destructivas. Se demuestra la factibilidad de realizar estimaciones fiables de la biomasa de *T. diversifolia* con modelos que utilizan pocas variables de fácil medición, en este caso, el volumen de dosel estimado, mediante el producto de la altura del dosel, por los dos diámetros, divididos entre dos y multiplicados por π , al cual, se aplica un factor de ajuste determinado por la densidad de dosel, según fórmula para calcular área de un dosel elipsoide.

Dada la relación entre el volumen, la producción de biomasa y el almacenamiento de carbono, se recomienda realizar estudios adicionales de modelación de la capacidad de almacenamiento de carbono de esta especie, en los tejidos leñosos.

Agradecimientos: A la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira y en especial al profesor Sanín Ortiz, por el espacio facilitado para el desarrollo del trabajo de campo; al Fondo de Investigaciones de la Universidad del Tolima, por el financiamiento del tiempo de los investigadores en este experimento. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados

BIBLIOGRAFÍA

1. ACOSTA, J.R.; ARAGÓN, M.; LLANOS, Y.; MADERO, E. 1997. Cartografía ultra detallada de suelos y evaluación de tierras del centro experimental de la Universidad Nacional de Colombia (CEUNP) sede Palmira. Acta Agron. 47(1):23-34.

2. ARMAND, D. 1994. Modèles pour une estimation rapide de la biomasse foliaire de *Morus alba* (CV. Kokuso 21) croissant en conditions diverses. Cah. Options Méditerr. 4:77-83.
3. BRYANT, F.C.; KOTHMANN, M.M. 1979. Variability in predicting edible browse from crown volume. J. Range Manage. 32:144-146.
4. DI RIENZO, J.A.; BALZARINI, M.G.; CASANOVES, F.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2008. InfoStat versión 2008. Córdoba (Argentina): Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba.
5. ETIENNE, M. 1989. Nondestructive methods for evaluating shrub biomass: a review. Oecol. Applic. IO (2.). 1:15-128.
6. GÁLVEZ, G.; SIGARROA, A.; LÓPEZ, T.; FERNÁNDEZ, J. 2010. Modelación de cultivos agrícolas. Algunos ejemplos. Cultivos Tropicales. 31(3):60-65.
7. GAYON, J. 2000. History of the concept of allometry. American Zoologist, 40(5):748-758.
8. GÓMEZ-CASTRO, H.; PINTO-RUIZ, R.; GUEVARA-HERNÁNDEZ, F.; GONZALEZ-REYNA, A. 2010. Estimaciones de biomasa aérea y carbono almacenado en *Gliricidia sepium* (Lam.) y *Leucaena leucocephala* (Jacq.) y su aplicación en sistemas silvopastoriles. ITEA. 106(4):256-270.
9. GOULD, S.J. 1966. Allometry and size in ontogeny and phylogeny. Biological Reviews. 41(4):587-638.
10. GUILLÉN, A.; PALACIOS, A.; ESPINOZA, J.L. 2007. Ecuaciones de predicción para la producción de forraje de palo verde (*Cercidium floridum* Benth. Ex a. Gray) en baja california sur, México. Interciencia. 32(10):712-715.
11. HUXLEY, J.S. 1924. Constant differential growth-ratios and their significance. Nature. 114: 895-896.
12. IGLESIAS, M.R.; BARCHUK, A.H. 2010. Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido (Argentina). Ecología Austral. 20(1):71-79.
13. LÓPEZ-MERLÍN, D.; SOTO-PINTO, L.; JIMÉNEZ-FERRER, G.; HERNÁNDEZ-DAUMÁS, S. 2003. Relaciones alométricas para la predicción de biomasa forrajera y leña de *Acacia pennatula* y *Guazuma ulmifolia* en dos comunidades del norte de Chiapas, México. Interciencia. 28(6):334-339.
14. LYON, J.L. 1968. Estimating twig production of serviceberry from crown volumes. J. Wildl. Manage. 32:115-119.
15. MORA-DELGADO, J. 2018. Aplicación de modelos matemáticos no lineales para la estimación de parámetros de crecimiento de *Alnus acuminata* en sistemas silvopastoriles de Roncesvalles, Tolima. En: Holguín, V.A.; García, I.I.; Mora-Delgado, J.(Eds.) Árboles y arbustos para silvopasturas. Universidad del Tolima, Ibagué. p.121-132.
16. PEEK, J.M. 1970. Relation of canopy area and volume to production of three woody species. Ecol. 51:1098-1101.
17. PICARD, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; HENRY, M. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Roma, Montpellier: FAO – CIRAD. 223p.
18. RIOFRÍO, J.; GRIJALVA, J.B. 2013. Modelos para estimar la biomasa de especies forestales en sistemas agroforestales de la Ecorregión andina del Ecuador. In Congresos Forestales. Memorias VI congreso Forestal Español. p.2-13.
19. RUIZ, T.E.; TORRES, V.; FEBLES, G.; DÍAZ H.; GONZÁLEZ J. 2012. Empleo de la modelación para estudiar el crecimiento del material vegetal 23 de *Tithonia diversifolia*. Rev. Cubana de Ciencia Agrícola. 46(1):23-29.
20. SANTIAGO-GARCÍA, W.; DE LOS SANTOS-POSADAS, H.M.; ÁNGELES-PÉREZ, G.; VALDEZ-LAZALDE, J.R.; CORRAL-RIVAS, J.J.; RODRÍGUEZ-ORTIZ, G.; SANTIAGO-GARCÍA, E. 2016. Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. Madera y Bosques, [S.l.], v. 21, n. 3. Disponible desde Internet en: <http://myb.ojs.incol.mx/index.php/myb/article/view/459/639> (con acceso 22/05/ 2018).
21. SAKAMOTO, Y.; ISHIGURO, M.; KITAGAWA, G. 1986. Akaike Information Statistics. KTK Scientific Publishers/D. Reidel Publishing, Tokyo/Dordrecht. 290p.
22. SEGURA, M.; ANDRADE, H.J. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? Agroforestería en las Américas. 46:89-96.

23. THORNE, M.S.; SKINNER, Q.D.; SMITH, M.A.; RODGERS, J.D.; LAYCOCK; D.W.A.; CEREKCI, S.A. 2002. Evaluation of a technique for measuring canopy volume of shrubs. *J. Range Manage.* 55:235-241.
24. ÜRESK, D.W.; GILBERT, R.O.; RICKARD, W.H. 1977. Sampling big sagebrush for phytomass. *J. Range Manage.* 30:311-314.
25. USDA Forest Service. 2010. Phase 3 Field Guide - Crowns: Measurements and Sampling, Version 5.0, October, 2010. Disponible desde Internet en: http://www.fia.fs.fed.us/library/field-guides-methods-proc/docs/2011/field_guide_p3_5-0_sec23_10_2010.pdf (con acceso 15/10/2017).
26. WAMBOLT, C.L.; CREAMER, W.H.; ROSSI, R.J. 1994. Predicting big sagebrush winter forage by sub-species and browse form class. *J. Range Manage.* 47:231-234.

Recibido: Noviembre 30 de 2017

Aceptado: Mayo 22 de 2018

Cómo citar:

Mora-Delgado, J., Holguín, V.A. 2018. Aplicación de modelos matemáticos no lineales para la estimación de biomasa forrajera de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 21(1): 43-50.