

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASA AÉREA DE *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst.

ALLOMETRIC EQUATIONS TO ESTIMATE AERIAL BIOMASS OF *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst.

Jorge Méndez González¹, Osvaldo Augusto Turlan Medina¹,
Julio Cesar Ríos Saucedo² y Juan Abel Nájera Luna³

RESUMEN

La medición y evaluación de la biomasa aérea de árboles juega un papel importante en el manejo de los recursos forestales. Existen muchos modelos alométricos para especies tropicales y subtropicales, pero muy pocos para las zonas semiáridas. Un total de 144 árboles de *Prosopis laevigata*, de siete rodales naturales localizados en el noreste de México, fueron muestreados por un método destructivo con la finalidad de desarrollar ecuaciones para la predicción de la biomasa total. La selección de los individuos cubrió varios intervalos de diámetro basal (5.2 a 41.8 cm) y de altura (1.4 a 9.7 m). Se contrastaron procedimientos de ajuste no-lineal y lineal de la ecuación alométrica $y = a \cdot x^b + \varepsilon$, para estimar la biomasa aérea de *P. laevigata*. Aunque, el procedimiento no-lineal tuvo el mejor ajuste ($R^2 = 0.95$ y $P < 0.001$) vs el lineal ($R^2 = 0.84$ y $P < 0.001$), los resultados demuestran que la transformación logarítmica y el uso de un factor de corrección en alometría mejora de forma significativa la predicción de la biomasa. Se concluye que los modelos de regresión obtenidos al usar el diámetro basal pueden ser aplicados para la estimación de biomasa total, en árboles de *Prosopis laevigata*. Así mismo, el número mínimo de observaciones necesarias para calcular los parámetros a y b , con varianza mínima es de 40 ejemplares.

Palabras clave: Alometría, estimación de biomasa, mezquite, manejo forestal, modelo lineal, modelo no-lineal.

ABSTRACT

The measurement and assessment of aboveground tree biomass plays a key role in the management of forest resources. Many allometric models exist for tropical and subtropical species, but only a few studies for species of semiarid zones. A total of 144 *Prosopis laevigata* trees from seven native stands (sites) located in northeast Mexico, were destructively sampled to develop total biomass prediction equations. Sampling covered various ranges of basal diameter (5.2 to 41.8 cm) and height (1.4 to 9.7 m). Here, we contrast nonlinear and linear fitting approaches of the allometric equation $y = a \cdot x^b + \varepsilon$, for estimating aboveground biomass of *Prosopis laevigata*. Although nonlinear procedure had the best fits ($R^2 = 0.95$ and $P < 0.001$) vs linear ($R^2 = 0.84$ and $P < 0.001$), the results highlight that the log-transform and the use of a weighted correction factor in allometry, improves significantly the biomass prediction of this specie. It is concluded that the obtained regression models using basal diameter, can be applied for the estimation of total biomass in *Prosopis laevigata* trees, but also that the minimum number of observations needed is 40 harvested trees to calculate parameters a and b with the least variance.

Key words: Allometry, biomass estimates, mesquite, forest management, nonlinear and linear model.

Fecha de recepción: 28 de marzo de 2012

Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2012

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Correo-e: jorgemendezgonzalez@gmail.com

² Campo Experimental Valle del Guadiana. CIR-Norte Centro. INIFAP

³ División de Estudios de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico de El Salto

INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono atmosférico (CO_2) es un componente esencial del proceso de fotosíntesis y, en consecuencia, de la vida; al mismo tiempo, actúa como una capa protectora del planeta, al cual mantiene con su temperatura actual: $\sim 15^\circ\text{C}$ que, de no existir, alcanzaría hasta -18°C (IPCC, 2001). No obstante, sus altos niveles atmosféricos han alterado el sistema climático. Así, el carbono (C) está presente en la atmósfera (750 Gt C); en los ecosistemas terrestres (plantas, 601 Gt C; suelo, 1,580 Gt C); y en los océanos (38,100 Gt C) (Beedlow *et al.*, 2004). Se ha documentado que el CO_2 atmosférico se ha incrementado en más de 100 ppm (36%) en los últimos 250 años, es decir, de 275 (era preindustrial) hasta 390 ppm (2010), lo que representa casi 2.0 ppm año^{-1} (Peters *et al.*, 2011) y 50 ppm en los últimos 30 años (Soon *et al.*, 1999). De acuerdo a las tendencias industriales, se pronostican concentraciones de 540 a 970 ppm de CO_2 para finales del presente siglo (Prentice *et al.*, 2000), que producirá un aumento en la temperatura media global de entre 3 y 5°C (IPCC, 2007); cabe señalar que esta ha variado cerca de 1°C en mil años (Soon *et al.*, 1999).

Los ecosistemas terrestres son importantes en el ciclo global del carbono, ya que almacenan en su biomasa 638 Gt C, poco menos que el C atmosférico (Brown, 1997a), cuyos flujos son de $120 \text{ Gt C año}^{-1}$ durante el proceso de la fotosíntesis (Beedlow *et al.*, 2004); sin embargo, de 2005 a 2010, en la biomasa forestal, el C ha disminuido $0.5 \text{ Gt C año}^{-1}$ (FAO, 2011) debido a la pérdida de bosques. Gran parte de los estudios de biomasa se han realizado en las zonas tropicales (Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2004) y templadas (Návar, 2009; Mendoza y Galicia, 2010).

Las zonas áridas de México representan más de 62 millones de hectáreas (Masera *et al.*, 1997); no obstante, de manera independiente a la ubicación geográfica, son pocos los estudios sobre almacenes de C que se han realizado en ellas (Gaillard *et al.*, 2002; Méndez *et al.*, 2006; Iglesias y Barchuk, 2010). Aun así, se ha documentado que el reservorio más importante de carbono en el país se ubica en la vegetación semiárida: 5 Gt CO_2 ; es decir, 31% del carbono (Masera *et al.*, 1997). La cuantificación de biomasa es de gran importancia, puesto que aproximadamente 50% de ella corresponde a este elemento (Brown, 1997b).

El género *Prosopis* es nativo y representativo de las zonas áridas y semiáridas (Pasiiecznik *et al.*, 2004; López *et al.*, 2006), constituye un grupo primitivo de la subfamilia Mimosoideae, tal vez originado en África tropical (Burkart, 1976). En México, se distribuye, principalmente, en los estados del norte y del centro (Rzedowski, 1988), y está representado por 11 especies (Palacios, 2006). Es un árbol espinoso, termo-xerófilo, perenne y alcanza hasta 12 m de altura; pertenece a la familia Leguminosae (Fabaceae) (Rzedowski, 1988; Pasiiecznik *et al.*, 2004).

INTRODUCTION

Atmospheric carbon dioxide (CO_2) is an essential component of photosynthesis, and, thus, of life. Moreover, it acts as a protective layer for the planet, which keeps it at its current temperature ($\sim 15^\circ\text{C}$); if it did not exist, such temperature could reach -18°C (IPCC, 2001). However, its high atmospheric levels have altered the climatic system. Carbon (C) is present in the atmosphere (750 Gt C); in land ecosystems (plants, 601 Gt C; soil, 1,580 Gt C); and oceans (38,100 Gt C) (Beedlow *et al.*, 2004). It has been documented that atmospheric CO_2 has increased in over 100 ppm (36%) during the last 250 years; that is, from 275 (preindustrial era) to 390 ppm (2010), which represents almost $2.0 \text{ ppm year}^{-1}$ (Peters *et al.*, 2011) and 50 ppm in the last 30 years (Soon *et al.*, 1999). According to industrial trends, CO_2 concentrations that range from 540 to 970 ppm have been predicted for the end of the current century (Prentice *et al.*, 2000), which will cause an increase from 3 to 5°C in the average global temperature (IPCC, 2007); it should be noted that temperature has varied around 1°C in the last thousand years (Soon *et al.*, 1999).

Land ecosystems are important for the global cycle of carbon, since they store 638 Gt C in their biomass, amount slightly below the atmospheric C (Brown, 1997a), which has a flow of $120 \text{ Gt C year}^{-1}$ during the process of photosynthesis (Beedlow *et al.*, 2004). However, from 2005 to 2010, in forest biomass, C has decreased $0.5 \text{ Gt C year}^{-1}$ (FAO, 2011), due to forest loss. Large part of the biomass studies has been carried out in tropical areas (Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2004) and in temperate areas (Návar, 2009; Mendoza and Galicia, 2010).

Arid zones in Mexico occupy over 62 million hectares (Masera *et al.*, 1997); however, regardless their geographical location, there are very little studies about C storage in them (Gaillard *et al.*, 2002; Méndez *et al.*, 2006; Iglesias and Barchuk, 2010). Nonetheless, the most important national carbon reservoir is located in the semi-arid vegetation: 5 Gt CO_2 ; that is, 31% of carbon (Masera *et al.*, 1997). Biomass quantification is of great importance, because it helps determine in around 50% the quantity of the element it is made of (Brown, 1997b).

The genus *Prosopis* is native to and representative of arid and semi-arid zones (Pasiiecznik *et al.*, 2004; López *et al.*, 2006). It constitutes a primitive group of the subfamily Mimosoideae, probably originated in tropical Africa (Burkart, 1976). In Mexico, it is mainly distributed in the northern and central states (Rzedowski, 1988), and is represented by 11 species (Palacios, 2006). It is a spiny, thermo-xerophile, perennial tree that can grow up to 12m high, and it belongs to the Leguminosae family (Fabaceae) (Rzedowski, 1988; Pasiiecznik *et al.*, 2004).

Given its importance in terms of use, distribution and ability to store CO_2 for long periods, and the previously mentioned lack of

Dada su importancia, en cuanto al uso, distribución, capacidad para almacenar CO₂ por periodos prolongados, y a la escasez de estudios antes mencionada es relevante e ineludible generar modelos para cuantificar su biomasa a escala geográfica local y regional.

La hibridación interespecífica en *Prosopis*, de manera especial en la sección *Algarobia*, genera confusión y dificulta su clasificación taxonómica (Rzedowski, 1988; Palacios, 2006). Por ello, para identificar la especie de los árboles analizados se llevaron a cabo estudios con marcadores morfológicos, cuyos resultados indicaron se trataba de *Prosopis laevigata* (Rosales *et al.*, 2011).

Los objetivos de la presente investigación fueron: 1) generar ecuaciones alométricas para cuantificar biomasa aérea de árboles individuales de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. en siete poblaciones distribuidas en el norte-centro de México; 2) evaluar la estimación de biomasa de *Prosopis laevigata* al ajustar el modelo alométrico en forma no-lineal y lineal; y 3) analizar los estadísticos de regresión en función del tamaño de muestra, para determinar el posible tamaño óptimo de observaciones para construir modelos alométricos en *Prosopis* spp.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en cuatro estados del norte-centro de México: Durango, Zacatecas, Coahuila y Chihuahua. Y se incluyeron siete localidades (Figura 1) conformadas por ejidos, predios particulares y campos experimentales del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Los suelos predominantes son del tipo Regosol (calcárico y eútrico), de textura media (INIFAP-CONABIO, 1995). De acuerdo a García-CONABIO (1998), el clima es BS₁hw (semárido - semicálido), con temperatura media de 18°C, precipitación anual de 125 a 600 mm. El intervalo altitudinal de los sitios fue de 1,097 a 2,001 m (INEGI, 1990) (Cuadro 1).

Método destructivo para obtener biomasa de *Prosopis* spp.

Se utilizó el método propuesto por Schlegel *et al.* (2000) que consiste en derribar el árbol, pesar en fresco sus componentes (hojas, ramas y fuste) y secarlos en estufa. Se seleccionaron individuos, sanos, distribuidos en el área y representativos de las categorías de diámetro y altura (Brown *et al.*, 1989), a los cuales se les midió, en pie el diámetro basal (DB), la altura total (H), el diámetro de copa (DC) y el número de ramas (NR). El uso de DB obedeció a que la mayoría de los individuos evaluados presentaron ramificaciones desde la base, lo que dificultó el uso del diámetro normal. Posterior al derribo, los componentes

studies, generating models for quantifying its biomass at local and regional level becomes relevant and unavoidable.

The interspecific hybridization in *Prosopis*, particularly in the *Algarobia* section, creates confusion and makes the taxonomic classification difficult (Rzedowski, 1988; Palacios, 2006). Therefore, in order to identify the analyzed tree species, studies with morphologic markers were carried out, whose results indicated it was *Prosopis laevigata* (Rosales *et al.*, 2011).

The objectives of the current research were: 1) generating allometric equations for quantifying aerial biomass of individuals of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. within seven populations distributed in the north-central part of Mexico; 2) evaluating the estimation of biomass of *Prosopis laevigata* by adjusting the allometric model in both linear and non-linear ways; and 3) analyzing the regression statistics, according to the sample size, in order to determine the possible optimal size of observation for developing allometric models in *Prosopis* spp.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The research was carried out in four states of the north-central part of Mexico: Durango, Zacatecas, Coahuila, and Chihuahua. Seven localities were included (Figure 1), which are constituted by ejidos, lands owned by particulars, and lands for experiments that belong to the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). The predominant soils were medium-textured calcaric and eutric Reghosols (INIFAP-CONABIO, 1995). According to García-CONABIO (1998), the climate is BS₁hw (semi-arid-semi-warm), with a medium temperature of 18°C, and an annual precipitation that ranges from 125 to 600 mm. The height interval of the sites ranged from 1,097 to 2,001 m (INEGI, 1990) (Table 1).

Destructive method for obtaining biomass of *Prosopis* spp.

We used the method proposed by Schlegel *et al.* (2000), which consists in felling the tree, weighting its fresh components (leaves, branches, and bole) and kiln drying them. Healthy individuals that were distributed in the area and which were representative of the diameter and height categories were selected (Brown *et al.*, 1989). Their basal diameter (DB), total height (H), crown diameter (DC), and branch number (NR) were calculated. DB was considered in the measurements because most of the evaluated individuals had branches rising from the base, which made the measurement of the normal diameter difficult. After felling, the fresh components were measured using a Rotter roman scale of 50, 25 kg capacity and 100 g precision. Four samples were obtained from each one, in order to calculate moisture content.

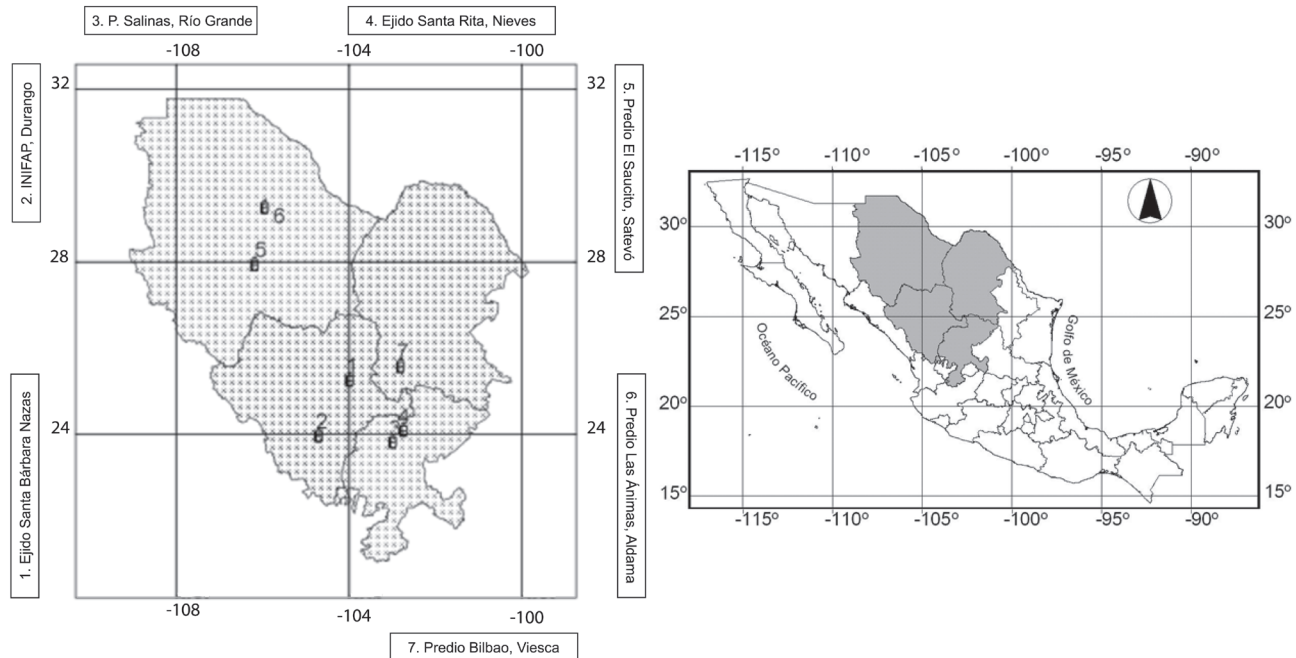


Figura 1. Distribución geográfica de los sitios de muestreo con poblaciones de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst.

Figure 1. Geographic distribution of the sampling sites with populations of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst.

fueron pesados en verde con una báscula romana marca Rotter de 50, 25 kg de capacidad y 100 g de precisión. De cada uno de ellos, se obtuvieron cuatro muestras para calcular el contenido de humedad.

En el laboratorio, el material se secó en una estufa marca Riossa a 105°C, hasta obtener el peso constante (Brown, 1997b; Schlegel *et al.*, 2000); después, de la razón entre el peso seco y el húmedo se calculó la biomasa seca. La biomasa total por árbol (BT), se obtuvo al sumar la biomasa de todos los componentes.

Modelo alométrico para cuantificar biomasa de *Prosopis laevigata*

La biomasa total de los árboles de cada sitio se estimó con la aplicación del modelo alométrico (Smith y Brand, 1983; Sprugel, 1983; Brown *et al.*, 1989; Tausch, 1989; Zianis y Mencuccini, 2004), de la forma:

$$y = a \cdot x^b + \varepsilon \quad (1)$$

Ajustada en forma logarítmica:

$$\ln y = \ln(a) + b \cdot \ln(x) + \varepsilon \quad (2)$$

In the lab, the material was kiln dried in a Riossa at 105°C, until the constant weight was obtained (Brown, 1997b; Schlegel *et al.*, 2000); afterwards, the dry biomass was determined by calculating the ratio of dry weight to wet weight. The total biomass per tree (BT) was obtained by adding the biomass of all components.

Allometric model for calculating biomass of *Prosopis laevigata*

The total biomass of the trees from each site was estimated by applying the allometric model (Smith and Brand, 1983; Sprugel, 1983; Brown *et al.*, 1989; Tausch, 1989; Zianis and Mencuccini, 2004), in the following terms:

$$y = a \cdot x^b + \varepsilon \quad (1)$$

Logarithmically adjusted:

$$\ln y = \ln(a) + b \cdot \ln(x) + \varepsilon \quad (2)$$

Where:

a = Exp(a) in equation 2
 y = Total aerial biomass (kg)
 x = Basal diameter (cm)
 a, b = Model parameters
 $\ln$ = Natural logarithm
 ε = Error.



Caudro 1. Características físicas del área de estudio e información dasométrica de los árboles muestreados de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst.Table 1. Physical characteristics of the area of study and mensuration of the sampled individuals of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst.

			Características físicas del área					Características dasométricas					
Sitio (S)	Nombre (Ejido/Predio)	Estado/ municipio	pp		Altitud (msnm)	Suelo tipo	Árboles (n)	DB		H		BT	
			(mm)					(cm)		(m)		(kg)	
			mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx			
1	Ej. Sta. Bárbara	Durango/Nazas	125	400	1,245	Rc	10	11.0	20.7	2.5	5.3	3.0	16.2
2	C.E. INIFAP	Durango/Dgo.	400	600	1,877	Re	30	5.2	31.5	2.6	6.4	3.1	229.1
3	P. Salinas	Zacatecas/Río Grande.	400	600	1,914	Re	14	6.8	26.0	3.2	8.2	10.3	265.5
4	Ej. Santa Rita	Zacatecas/Nieves	125	400	2,001	I	15	7.3	27.0	2.7	5.7	11.3	367.5
5	P. El Saucito	Chihuahua/Satevó	125	400	1,537	Rc	27	5.9	41.8	1.4	9.7	8.1	558.7
6	P. Las Ánimas	Chihuahua/Aldama	125	400	1,211	Re	22	6.0	39.0	2.0	8.5	7.7	490.6
7	P. Bilbao	Coahuila/Viesca	125	400	1,097	I	26	5.2	32.1	2.7	6.3	4.7	117.7

S = orden del sitio; Ej. = ejido; C.E. = Campo Experimental; P = Predio; pp = intervalo de precipitación anual; Rc = Regosol cal cárico; Re = Regosol eútrico; I = Litosol; n = número de árboles; DB = diámetro a la base del árbol; H = altura total del árbol; BT = biomasa total.

S = site order; Ej. = ejido; C.E. = Experimental Station; P = Land; pp = annual precipitation range; Rc = Calcaric regosol; Re = Eutric regosol; I = Litosol; n = number of trees; DB = diameter to the base; H = total height of the tree; BT = total biomass.

Donde:

α = Exp(α) en ecuación 2
 y = Biomasa aérea total (kg)
 x = Diámetro basal (cm)
 a y b = Parámetros del modelo
 $\ln$ = Logaritmo natural
 ε = Error.

La transformación logarítmica corrige la heterogeneidad de la varianza de y con respecto αx (Brown *et al.*, 1989), al incrementar la validez estadística del modelo debido a la homogenización de la varianza (Sprugel, 1983; Zianis y Menauccini, 2004). Se obtuvo la R^2 ajustada, conocida como índice de ajuste, para evaluar la predicción de los modelos; así como otros estadísticos: error, coeficiente de variación y significancia del modelo (Návar, 2010). El modelo se ajustó con el programa SAS (versión 9.0) al utilizar 'proc nlin' (con derivadas y el algoritmo de Newton - Raphson) en la ecuación (1) y 'proc reg' para la ecuación (2), en ambas se resolvió con cuadrados mínimos (Brown *et al.*, 1989; Gaillard *et al.*, 2002).

Cuando las unidades originales son re-transformadas en el modelo (2) los valores más grandes se subestiman (Brown *et al.*, 1989); para corregirlo, Sprugel (1983) propuso la aplicación de un factor de corrección ponderado, el cual se expresa por:

The logarithmic transformation corrects the heterogeneity of the variance of y with regard to αx (Brown *et al.*, 1989), by increasing the statistical validity of the model due to the homogenization of variance (Sprugel, 1983; Zianis and Menauccini, 2004). The adjusted R^2 , known as adjustment index, was obtained in order to evaluate the model prediction, as well as other statistics, such as: error, coefficient of variation and model significance (Návar, 2010). The model was adjusted with the SAS program (version 9.0), using 'proc nlin' (with derivatives and the Newton - Raphson algorithm) in equation (1), and 'proc reg' in equation (2), figured out in both with least squares (Brown *et al.*, 1989; Gaillard *et al.*, 2002).

When the original units are retransformed in model (2), the highest values are underestimated (Brown *et al.*, 1989); in order to correct this, Sprugel (1983) suggested the application of a weighted correction factor, expressed by:

$$FC = \exp^{(SEE^2/2)}$$

Where:

FC = Correction factor
 exp = Exponential
 SEE = Estimation standard error.

$$FC = \exp^{(SEE^2/2)}$$

Donde:

FC = Factor de corrección
exp = Exponencial
SEE = Error estándar de la estimación.

$$SEE = \sqrt{\sum (\log y_{obs} - \log y_{est})^2 / (N - 2)}$$

Donde:

y_{obs} = Biomasa observada
 y_{est} = Biomasa estimada
N = Número de observaciones.

Modelo global para cuantificar biomasa de *Prosopis laevigata* en todos los sitios

Las ecuaciones 1 y 2 se utilizaron en todo el conjunto de datos de biomasa de *Prosopis laevigata* (144 árboles) para verificar la aplicabilidad de una ecuación global. El ajuste de los modelos consideró los criterios estadísticos citados con anterioridad. Además, se realizó un análisis multivariado de conglomerados, en el cual se usaron las variables estandarizadas: DB, H, DC, NR y BT, a través de la distancia euclidiana y agrupamiento jerárquico de Ward (Ward, 1963).

Así mismo, la ecuación 1 se ajustó a diferentes tamaños de muestra n (10, 20, 30... 130 y 140) obtenidos al azar con reemplazo. Los estadísticos R^2 , coeficiente de variación y parámetros de regresión (a y b) se consideraron para determinar las mejores estimaciones de biomasa, en función del tamaño de muestra y , con estas últimas, probar la teoría fractal de que $b = 2.67$ (Enquist *et al.*, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diámetro basal de *Prosopis laevigata* varió de 5.2 cm (S2 y S7) a 41.8 cm (S5); es decir, comprendió distintas categorías diamétricas. Se observa que sus poblaciones, localizadas en los cuatro estados, poseen estructuras dimensionales diferentes (Cuadro 1) pero, en general, similares a los estudios realizados con *Prosopis glandulosa*, var. *torreyana* (L.D. Benson) M. C. Johnst. (diámetro de 4 a 45 cm) en el noroeste de México. En el matorral espinoso Tamaulipeco, Návar *et al.* (2004) registraron un diámetro basal de hasta 24 cm en árboles de *Prosopis glandulosa* Torr. y de 34 cm en *Prosopis laevigata*. Al norte de Argentina, *Prosopis flexuosa* DC. y *P. torquata* DC. sus diámetros basales alcanzan valores de 35.5 y 29.3 cm, respectivamente (Iglesias y Barchuk, 2010). Por otra parte, se apreciaron diferencias importantes en la biomasa de los árboles entre sitios de muestreo; por ejemplo, diámetros basales similares máximos (S2 y S7; S3 y S4) poseen más de

$$SEE = \sqrt{\sum (\log y_{obs} - \log y_{est})^2 / (N - 2)}$$

Where:

y_{obs} = Observed biomass
 y_{est} = Estimated biomass
N = Number of observations.

Global model for quantifying the biomass of *Prosopis laevigata* in all sites

Equations 1 and 2 were used in the whole set of biomass data of *Prosopis laevigata* (144 trees) in order to verify the applicability of a global equation. Adjusting the models required considering the previously mentioned statistic criteria. Moreover, a conglomerate multivariate analysis was carried out, which used the standardized variables: DB, H, DC, NR y BT, through Euclidian distance and Ward's hierarchical clustering (Ward, 1963).

Moreover, equation 1 was adjusted to different n sample sizes (10, 20, 30... 130 y 140) obtained at random with a replacement. The R^2 statistics, variation coefficient and regression parameters (a and b) were considered for determining the best biomass estimations, depending on the sample size, and, along with the latter, proving the fractal theory that $b = 2.67$ (Enquist *et al.*, 1998).

RESULTS AND DISCUSSION

The basal diameter of *Prosopis laevigata* ranged from 5.2 cm (S2 and S7) to 41.8 cm (S5); this means that several diametrical categories were included. It was observed that their populations, located in the four previously mentioned states have different dimensional structures (Table 1), but, in general terms, results are similar to the studies carried out on *Prosopis glandulosa*, var. *torreyana* (L.D. Benson) M. C. Johnst. (diameter of 4 to 45 cm) in northeastern Mexico. In the thorn shrubs of Tamaulipas, Návar *et al.* (2004) registered a basal diameter of up to 24 cm in individuals of *Prosopis glandulosa* Torr., and up to 34 cm in those of *Prosopis laevigata*. In northern Argentina, the basal diameters of *Prosopis flexuosa* DC. and *P. torquata* DC. reached values of up to 35.5 and 29.3 cm, respectively (Iglesias and Barchuk, 2010). On the other hand, we observed important differences in tree biomass depending on the sample site; for instance, the maximum similar basal diameters (S2 and S7; S3 and S4) show a difference of over 100 kg (Table 1), which could have been a consequence of partial exploitation or of the differential forest activities practiced within the populations of *Prosopis laevigata*.



100 kg de diferencia (Cuadro 1), lo cual pudo deberse al aprovechamiento parcial o a las actividades silvícolas diferenciales practicadas en las poblaciones de *Prosopis laevigata*.

Estimaciones de biomasa de *Prosopis laevigata* en sitios individuales

El modelo alométrico ajustado en las formas 1 y 2 presentó alta significancia estadística ($P < 0.0001$) en los sitios evaluados. El modelo 1 mostró los mejores ajustes con valores de $R^2 > 0.90$ en todos los casos (Cuadro 2), con un máximo de 0.98 (S2) y 0.97 (S1 y S6). Por el contrario, en el modelo 2 (logarítmico) se registraron R^2 más bajas (hasta 0.73 en S7); es decir, un ajuste menor, 10% en promedio, en comparación con el modelo 1.

El análisis de resultados evidencia que la mayor variación de biomasa en los árboles de *Prosopis laevigata* se observa en S5, según se indica por el CV de 39.45 y 56.89% en los modelos 1 y 2; mientras que, la variación más pequeña se determinó en individuos

Biomass estimations of *Prosopis laevigata* in individual sites

The allometric model adjusted in forms 1 and 2 showed a high statistical significance ($P < 0.0001$) in the evaluated sites. Model 1 showed the best adjustments with $R^2 > 0.90$ in all cases (Table 2), and maximum values of 0.98 (S2) and 0.97 (S1 and S6). On the other hand, model 2 (logarithmic) registered lower R^2 (up to 0.73 in S7); that is, there was less adjustment, an average of 10%, in contrast with model 1.

The result analysis shows that the highest biomass variation in individuals of *Prosopis laevigata* was observed in S5, as was indicated by the CV percentages (39.45 and 56.89% in models 1 and 2); on the other hand, the smallest variation was determined in individuals with a lower amount of biomass (S1 and S2), with a CV of around 20% (Table 2). The lowest average CV (28.87%) obtained with model 1 is also translated into a lower adjustment for estimating total aerial biomass for this species (Table 2). The results show

Cuadro 2. Estadísticos del modelo alométrico ajustado en forma no-lineal y lineal para estimar la biomasa aérea de siete poblaciones de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. en el norte-centro de México.

Table 2. Statistics of the allometric model adjusted in non-linear and linear ways in order to estimate the aerial biomass of seven populations of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst. in the north-central part of Mexico.

Ecuación	Sitio	Sxy (kg)	CV (%)	R^2	$P > F$	a	b	FC	FC (%)
1) $y = a \cdot x^b$	1	12.9	19.08	0.97	<0.0001	0.346	1.679	-	
	2	10.3	20.62	0.98	<0.0001	0.056	2.383	-	
	3	36.5	36.91	0.91	<0.0001	0.108	2.200	-	
	4	28.7	29.08	0.95	<0.0001	0.127	2.161	-	
	5	38.9	39.45	0.94	<0.0001	0.041	2.513	-	
	6	23.6	30.06	0.97	<0.0001	0.018	2.767	-	
	7	7.9	26.88	0.95	<0.0001	0.751	1.458	-	
	$\bar{x}$	22.6	28.87	0.95		0.207	2.166		
2) $\ln y = \ln(a) + b \cdot \ln(x)$	1	17.9	26.38	0.80	<0.0001	-1.805	1.906	1.029	2.88
	2	10.5	21.06	0.97	<0.0001	-2.688	2.319	1.028	2.81
	3	38.2	38.58	0.77	<0.0001	-1.688	2.016	1.059	5.89
	4	31.4	31.84	0.88	<0.0001	-1.156	1.879	1.052	5.15
	5	56.1	56.89	0.81	<0.0001	-1.383	1.933	1.047	4.73
	6	35.2	44.77	0.91	<0.0001	-2.204	2.210	1.040	4.05
	7	12.0	40.56	0.73	<0.0001	-1.316	1.840	1.045	4.48
	$\bar{x}$	28.7	37.15	0.84		-1.749	2.015	1.043	4.28

Todos los coeficientes de regresión fueron estadísticamente significativos ($P < 0.001$).

y = biomasa aérea total (kg); x = diámetro basal (cm); a y b = parámetros del modelo; $\ln$ = logaritmo natural; Sxy = error estándar; CV = coeficiente de variación; R^2 = coeficiente de determinación; $P > F$ = significancia del modelo; FC = factor de corrección; FC% = Factor de corrección porcentual.

All the regression coefficients were statistically significant ($P < 0.001$).

y = total aerial biomass (kg); x = basal diameter (cm); a and b = parameters of the model; $\ln$ = natural logarithm; Sxy = standard error; CV = variation coefficient; R^2 = determination coefficient; $P > F$ = significance of the model; FC = correction factor; FC% = Per cent correction factor.

con menor cantidad de biomasa (S1 y S2), con alrededor de 20% de CV (Cuadro 2). El menor CV promedio (28.87%) obtenido con el modelo 1, se traduce, también, en un mejor ajuste para estimar la biomasa aérea total en esta especie (Cuadro 2). Los resultados demuestran variaciones importantes en la biomasa estimada; por ejemplo, a un diámetro de 40 cm se tienen diferencias desde 200 hasta 300 kg (BT, S1 - BT con respecto a los otros sitios), excepto en S7, y de 100 hasta 200 kg calculados con los modelos 1 y 2, respectivamente (figuras 2C y 2D). Lo anterior podría deberse a la intensidad de aprovechamiento (podas o cortas de saneamiento), a nivel árbol.

En *Prosopis glandulosa* var. *torreyana*, Méndez *et al.* (2006) consignan una R^2 de 0.87 y CV de más de 50%, al usar el modelo 1. A partir del ajuste de la ecuación logarítmica, Iglesias y Barchuk (2010) calcularon una R^2 de 0.87 y 0.88 para *Prosopis torquata* y *Prosopis flexuosa* DC., pero con CV de hasta 80%. La aplicación del factor de corrección FC, que promedia 1.043 a la ecuación logarítmica, aumentó las estimaciones de biomasa de 2.8% (S2) a 5.9% (S3) (Cuadro 2); sin embargo, el modelo 1 predijo mejor la biomasa de *Prosopis laevigata* que el modelo 2. Chave *et al.* (2004) han señalado que el FC en bosques tropicales es de 1.068 ± 0.022 y, en cuanto a bosques templados, Nívar (2010) indica 1.065 ± 0.072 (media $\pm$ desviación estándar), con ello se demuestra que el FC es similar casi en todas las especies. Nívar *et al.* (2004) sostienen que en *Prosopis* se obtienen estimaciones sesgadas de biomasa con el modelo 1. Se ha documentado, en distintas especies, que la varianza con el modelo 1 se incrementa con el tamaño del árbol (Tausch, 1989; Brown *et al.*, 1989), lo cual le resta validez al modelo. Algunos autores (Tausch, 1989; Litton y Kauffman, 2008) prefieren usar la forma no-lineal para estimar la biomasa aérea en especies vegetales, siempre y cuando se satisfaga la varianza común.

Un modelo global para la estimación de la biomasa de *Prosopis laevigata*

En el análisis global de los datos de biomasa de *Prosopis laevigata* del área de estudio, se observó que el mejor ajuste se alcanzó con la ecuación 1 ($R^2 = 0.91$), que fue muy superior a la obtenida con el modelo 2 ($R^2 = 0.69$), aunque ambas tuvieron alta significancia ($P < 0.0001$) (Cuadro 3), incluso 0.04 unidades de R^2 más que el promedio de los siete sitios (Cuadro 2). Tausch (1989) ha citado mejores ajustes con el modelo 1, y ha señalado que esto depende de la especie. El considerar todos los datos de biomasa de *Prosopis laevigata* en un solo modelo (lineal y no-lineal) amplió la variación en y (Figura 3A), al incrementar de forma substancial el error estándar (hasta 38.32 kg: modelo lineal) y el coeficiente de variación (54.09%: modelo lineal), con 10.71 kg y 18.3% respectivamente, más que el promedio de los sitios (cuadros 2 y 3).

El factor de corrección (1.198) derivado del análisis global (Cuadro 3) mejoró las estimaciones de biomasa, las cuales fueron semejantes a las obtenidas con el modelo 1 (Figura 3A).

important variations in the estimated biomass; for instance, at a 40 cm diameter, there are differences that range from 200 to 300 kg (BT, S1 - BT related to other sites), except in S7, and differences that go from 100 to 200 kg calculated with models 1 and 2, respectively (figures 2C and 2D). This could be due to the exploitation intensity (pruning and thinning) at tree level.

In *Prosopis glandulosa* var. *torreyana*, Méndez *et al.* (2006) report a value of R^2 that corresponds to 0.87 and a CV per cent of over 50% when using model 1. After adjusting the logarithmic equation, Iglesias and Barchuk (2010) calculated a value of R^2 of 0.87 and 0.88 for *Prosopis torquata* and *Prosopis flexuosa* DC., but with a CV of over 80%. Applying the FC correction factor, which averages out the logarithmic equation to 1.043, increased the biomass estimations from 2.8% (S2) to 5.9% (S3) (Table 2); however, model 1 predicted the biomass of *Prosopis laevigata* better than model 2. Chave *et al.* (2004) have reported that the FC in tropical rainforests is 1.068 ± 0.022 , and in the case of temperate rainforests, Nívar (2010) reports 1.065 ± 0.072 (median $\pm$ standard deviation). This shows that FC is similar in almost all species. Nívar *et al.* (2004) argue that model 1 provides biased biomass estimates for *Prosopis*. It has been documented for diverse species that the variance with model 1 increases with the size of the tree (Tausch, 1989; Brown *et al.*, 1989), which lessens the validity of the model. Some authors (Tausch, 1989; Litton and Kauffman, 2008) prefer using the non-linear form for estimating the aerial biomass of vegetable species, as long as the common variance is satisfied. Figure 2. Relation between total biomass and basal diameter (above), and biomass differences (BT, S1 - BT rest of the sites) (below) estimated in both non-linear (A and C) and linear (B and D) ways, within seven populations of *Prosopis laevigata* in northern Mexico.

Global model for estimating the biomass of *Prosopis laevigata*

In the global analysis of the biomass data of *Prosopis laevigata* in the area of study, it was observed that the best adjustment was achieved with equation 1 ($R^2 = 0.91$), which was quite superior to that obtained with model 2 ($R^2 = 0.69$), although both had high significance levels ($P < 0.0001$) (Table 3), even 0.04 more R^2 units than the average of the seven sites (Table 2). Tausch (1989) has reported better adjustments with model 1, and has pointed out that this depends on the species. When all the *Prosopis laevigata* biomass data are considered in a single model (linear and non-linear) the y variation was widened (Figure 3A), by substantially increasing the standard error (up to 38.32 kg: linear model) and the variation coefficient (54.09%: linear model) by 10.71 kg and 18.3% more than the average of the sites, respectively (tables 2 and 3).

The correction factor (1.198) came from the global analysis (Table 3) improved the biomass estimations, which were similar to those obtained with model 1 (Figure 3A). The most

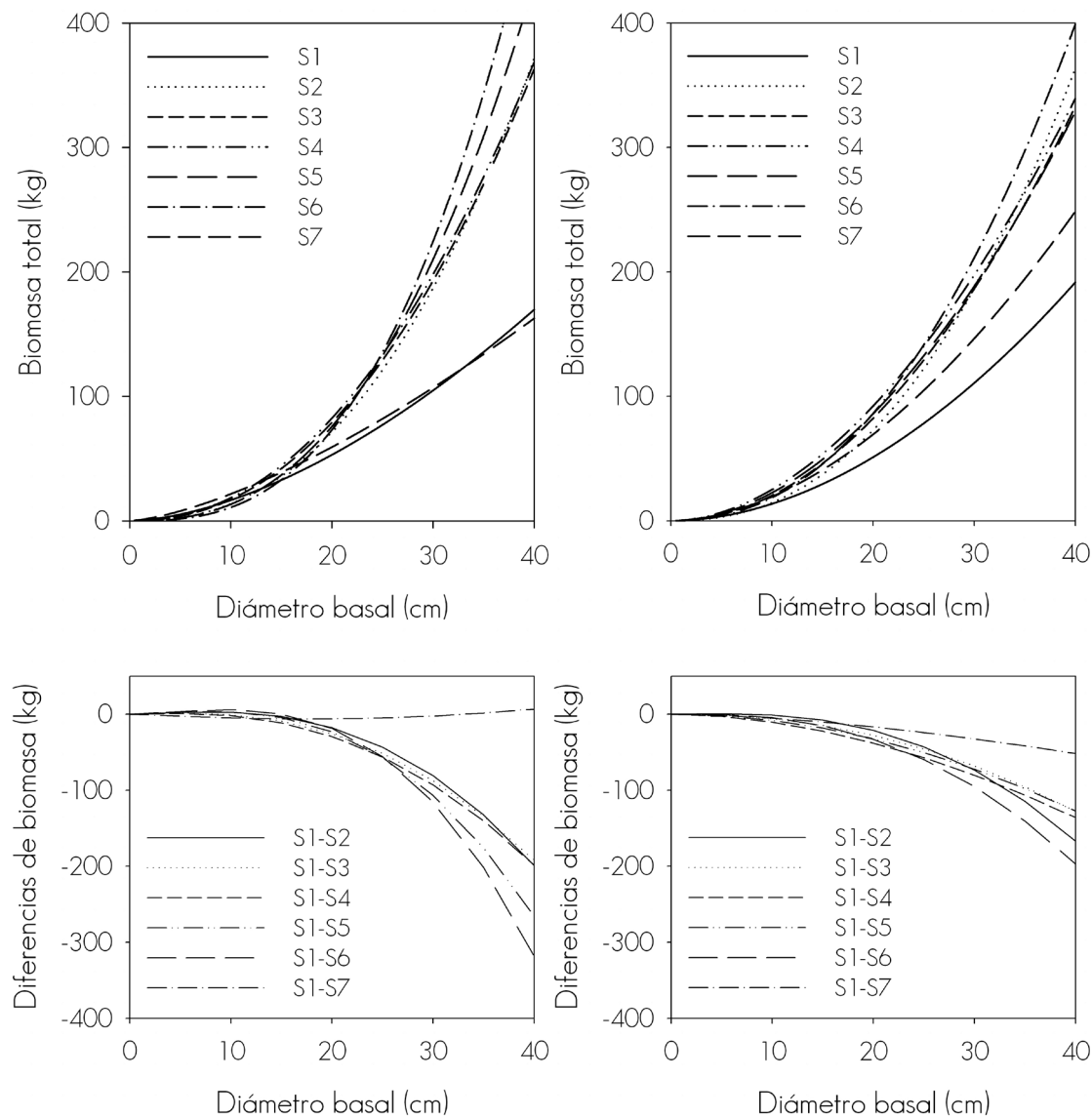


Figura 2. Relación entre biomasa total y diámetro basal (arriba) y diferencias de biomasa (BT , $S1 - BT$ resto de los sitios) (abajo) estimada en forma no-lineal (A y C) y lineal (B y D), en siete poblaciones de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) del norte de México.

Figure 2. Relation between total biomass and basal diameter (above), and biomass differences (BT , $S1 - BT$ rest of the sites) (below) estimated in both non-linear (A and C) and linear (B and D) ways, within seven populations of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) in northern Mexico.

Las diferencias más significativas de biomasa (modelo no-lineal - modelo lineal), de 100 kg a un diámetro de 40 cm obtenidos con el modelo global, se registraron en árboles de mayores dimensiones, mismas que se incrementan de modo exponencial, a partir del punto de inflexión entre ellos: a 23 cm de diámetro (Figura 3B). La biomasa promedio de $N = 144$ árboles fue de 60.85 kg y el error estándar promedio por árbol estimado con $\sqrt{FC^2 - 1 \cdot BT}$ (Chave et al., 2004) resultó de 4.83 kg, que puede ser calculado de forma individual con:

significant biomass differences (non-linear model - linear model), from 100 kg at a 40 cm diameter obtained with the global model, were found in trees of higher dimensions, which increased exponentially, around the inflection point between them: at a 23 cm diameter (Figure 3B). The average biomass of $N = 144$ trees was 60.85 kg, and the average standard error per tree, estimated with $\sqrt{FC^2 - 1 \cdot BT}$ (Chave et al., 2004) was 4.83 kg, which can be individually measured with this formula:

$$y' = 0.2638x^{1.0246} (R^2 = 0.9077 \text{ y } P < 0.001)$$

Donde:

y' = Error estándar árbol⁻¹ (kg)
 x = DB (cm).

$$y' = 0.2638x^{1.0246} (R^2 = 0.9077 \text{ y } P < 0.001)$$

Where:

y' = Standard error tree⁻¹ (kg)
 x = DB (cm).

Cuadro 3. Estadísticos del modelo alométrico no-lineal y lineal (N = 144) ajustado a la biomasa aérea de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)M.C. Johnst. de siete localidades del norte-centro de México.

Table 3. Statistics of the non-linear and linear allometric model (N = 144) adjusted to the aerial biomass of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)M.C. Johnst. from seven localities in the north-central part of Mexico.

N	Modelo	Sxy (kg)	CV (%)	R ²	P > F	a	b	FC
144	no-lineal	33.42	47.17	0.91	< 0.0001	0.0360	2.5223	
144	lineal	38.32	54.09	0.69	< 0.0001	-1.8344	2.0492	1.198

N = número de árboles de toda la población; Sxy = error estándar; CV = coeficiente de variación; R² = coeficiente de determinación; P > F = significancia del modelo; a y b = parámetros del modelo, FC = factor de corrección.

N = number of trees of the whole population; Sxy = standard error; CV = variation coefficient; R² = determination coefficient; P > F = significance of the model; a and b = parameters of the model, FC = correction factor

Lo anterior expresa el buen ajuste del modelo logarítmico, incluso la aplicabilidad de ambos para estimar la biomasa aérea de *Prosopis laevigata* en ciertas categorías diamétricas. Resultados que concuerdan con lo registrado por Tausch (1989) y Nívar (2009); al respecto, este último recomienda usar dos ecuaciones: una para diámetros de árboles pequeños y otra para diámetros de árboles grandes.

El ajuste global fue bueno, si se considera que los datos representan poblaciones de cuatro estados del norte-centro de México (Figura 1). No obstante, los individuos de los sitios evaluados muestran diferencias substanciales de biomasa aérea en las mismas categorías diamétricas, por lo que se decidió clasificar los sitios para proponer un mejor uso de los resultados. El análisis multivariado de conglomerados arrojó una correlación cofenética de 0.769, que resultó en la conformación de algunos grupos y subgrupos (Figura 4), semejantes a sitios geográficamente cercanos (Figura 1). Así, se evidencia una clara similitud entre S1 y S7, S5 y S6 (pares de curvas: parte inferior y superior Figura 2A), cuya semejanza entre curvas modelo no-lineal/dendrograma es concordante por tratarse de datos no logarítmicos en Figura 2A.

Estadísticos de regresión en función de n

La aplicación del modelo 1 a los datos de biomasa con diferentes tamaños de muestra presentó, en todos los casos, alta significancia estadística (P < 0.0001). El mejor ajuste del modelo se obtuvo con n = 20 (R² = 0.96 y CV = 32.47%); por el contrario, el ajuste más bajo (R² = 0.88 y CV = 54.78%) se calculó con n = 100 (Cuadro 4). De acuerdo a los resultados, se observó un aumento de b al mismo tiempo que CV (r = 0.5914; P = 0.0259); un incremento de Sxy (r = 0.5272; P = 0.0527) y

This shows the good adjustment of the logarithmic model, and even the applicability of both for estimating the aerial biomass of *Prosopis laevigata* in certain diametrical categories. Results match with those reported by Tausch (1989) and Nívar (2009); on this subject, the latter recommends using two equations: one for diameters of small trees and other for diameters of large trees.

Global adjustment was efficient, if it is taken into account that the data represents populations from four states of the north-central part of Mexico (Figure 1). However, the individuals from the evaluated sites show substantial aerial biomass differences in the same diametrical categories, which is why it was decided to classify the sites in order to suggest a better use of the results. The multivariate analysis of conglomerates threw a cophenetic correlation coefficient of 0.769, which resulted in the conformation of certain groups and sub-groups (Figure 4), similar to nearby sites (Figure 1). Thus, a clear similarity between S1 and S7, S5 and S6 is established (pairs of curves: lower and upper part Figure 2A), whose similarity among curves in the non-linear model/dendrogram is consistent because the data in Figure 2A is not logarithmic.

Regression statistics around n

Applying model 1 to the biomass data with different sample sizes showed, in all cases, a high statistical significance (P < 0.0001). The best adjustment of the model was obtained with n = 20 (R² = 0.96 and CV = 32.47%); on the other hand, the lowest adjustment (R² = 0.88 and CV = 54.78%) was calculated with n = 100 (Table 4). According to the results, we observed an increase of b along with that of CV (r = 0.5914; P = 0.0259); and an increase of Sxy (r = 0.5272; P = 0.0527) and of CV (r = 0.6066; P = 0.0214) as n increases. Finally, the highest

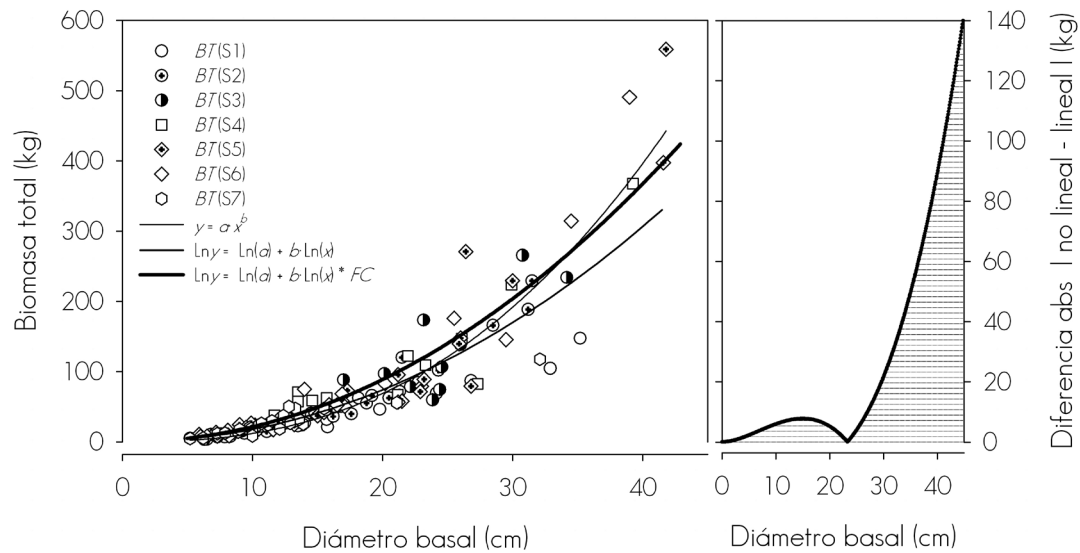


Figura 3. Relación entre biomasa total y diámetro basal A) y diferencias de biomasa estimadas con modelo no-lineal - lineal B) en *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)M.C Johnst. de siete localidades del norte-centro de México.

Figure 3. Relation between total biomass and basal diameter A) and differences of biomass estimated with a non-linear -linear model B) in *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)M.C Johnst. from seven localities from the north-central part of Mexico.

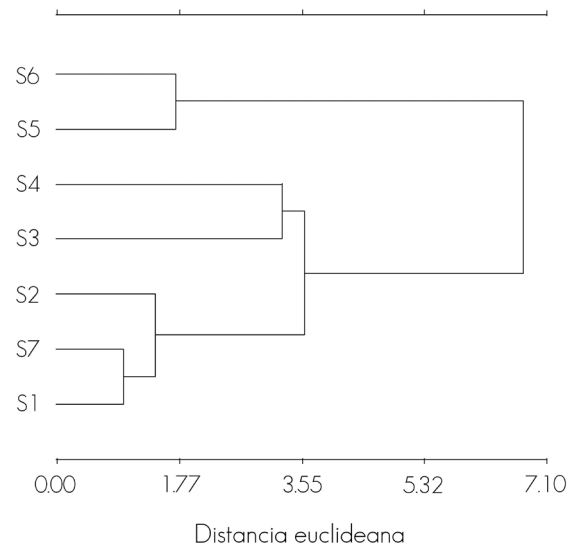


Figura 4. Agrupamiento de siete poblaciones/sitios de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)M.C. Johnst. en el norte-centro de México, en función de variables dimensionales y de biomasa total.

Figure 4. Clustering of seven populations/sites of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)M.C. Johnst. in the north-central part of Mexico, around dimensional and total biomass variables.

de CV ($r = 0.6066$; $P = 0.0214$) conforme aumenta n . Por último, se registró una mayor variación en la estimación de biomasa (CV) de *Prosopis laevigata* al aumentar el diámetro basal promedio ($\overline{DB}$) ($r = 0.6491$; $P = 0.0120$). Los resultados demuestran una correlación estrecha entre los parámetros a y b al seguir una función de la forma:

$$b = 1.5855a^{-0.1381} (R^2 = 0.9933 \text{ y } P < 0.0001)$$

$$a = 26.995b^{-7.1950} (R^2 = 0.9933 \text{ y } P < 0.0001)$$

Relaciones similares han sido documentadas por Zianis y Mencuccini (2004) y Nívar (2009).

variation in the estimation of biomass (CV) of *Prosopis laevigata* was registered when the average basal diameter increased ($\overline{DB}$) ($r = 0.6491$; $P = 0.0120$). Results show a close correlation between parameters a and b when applying the following function:

$$b = 1.5855a^{-0.1381} (R^2 = 0.9933 \text{ y } P < 0.0001)$$

$$a = 26.995b^{-7.1950} (R^2 = 0.9933 \text{ y } P < 0.0001)$$

Similar relations have been documented by Zianis and Mencuccini (2004) and by Nívar (2009).

The R^2 and CV statistics show a logarithmic tendency regarding n , which is why the following model was applied:

Cuadro 4. Estadísticos de regresión del modelo $y = a \cdot x^b$ ajustado a la biomasa aérea total de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)M.C. Johnst. a partir del uso de diferentes tamaños de muestra.

Table 4. Regression statistics of model $y = a \cdot x^b$ adjusted to the total aerial biomass of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)M.C. Johnst. according to the use of different sample sizes.

n	Modelo	($\overline{DB}$) (cm)	($\overline{BT}$) (kg)	Sxy (kg)	CV (%)	R^2
10	$BT = 0.065 \cdot DB^{2.297}$	13.3	40.9	16.6	40.59	0.94
20	$BT = 0.047 \cdot DB^{2.452}$	17.9	80.8	26.2	32.47	0.96
30	$BT = 0.080 \cdot DB^{2.252}$	18.4	80.4	38.3	47.59	0.90
40	$BT = 0.237 \cdot DB^{1.905}$	15.3	50.7	21.6	42.56	0.91
50	$BT = 0.073 \cdot DB^{2.284}$	18.3	77.0	30.6	39.79	0.92
60	$BT = 0.017 \cdot DB^{2.775}$	16.9	78.0	32.3	41.47	0.94
70	$BT = 0.019 \cdot DB^{2.707}$	17.7	83.1	40.7	48.99	0.91
80	$BT = 0.105 \cdot DB^{2.180}$	17.2	66.1	23.9	35.92	0.94
90	$BT = 0.018 \cdot DB^{2.732}$	16.3	68.8	32.0	46.72	0.93
100	$BT = 0.043 \cdot DB^{2.455}$	16.5	64.4	35.3	54.78	0.88
110	$BT = 0.034 \cdot DB^{2.539}$	16.6	69.9	36.2	51.77	0.90
120	$BT = 0.032 \cdot DB^{2.559}$	16.8	71.2	34.1	47.92	0.91
130	$BT = 0.033 \cdot DB^{2.547}$	16.9	71.1	34.8	48.48	0.91
140	$BT = 0.036 \cdot DB^{2.527}$	16.9	71.6	33.8	47.24	0.91
	$BT = 0.060 \cdot DB^{2.444}$	16.8	69.5	31.1	44.74	0.92

n = tamaño de muestra; BT = biomasa aérea total; DB = diámetro basal; $\overline{DB}$ = diámetro basal promedio; Sxy = error estándar; CV = coeficiente de variación; R^2 = coeficiente de determinación. En todos los casos se obtuvo alta significancia estadística ($P < 0.0001$).

n = sample size; BT = total aerial biomass; DB = basal diameter; $\overline{DB}$ = average basal diameter; Sxy = standard error; CV = variation coefficient; R^2 = determination coefficient. Statistical significance was obtained in all cases ($P < 0.0001$).

Los estadísticos R^2 y CV muestran una tendencia logarítmica con respecto a n , por ello, se aplicó el modelo del tipo:

$$y = a + b \cdot \ln(x)$$



$$y = a + b \cdot \ln(x)$$

Where:

" y " represents R^2 (Figure 5A) and CV (Figure 5B)

" x " = Sample size.

However, in order to magnify the tendency, we obtained the first derivative of the following model:

Donde:

"y" representa R^2 (Figura 5A) y CV (Figura 5B)

"x" = Tamaño de muestra.

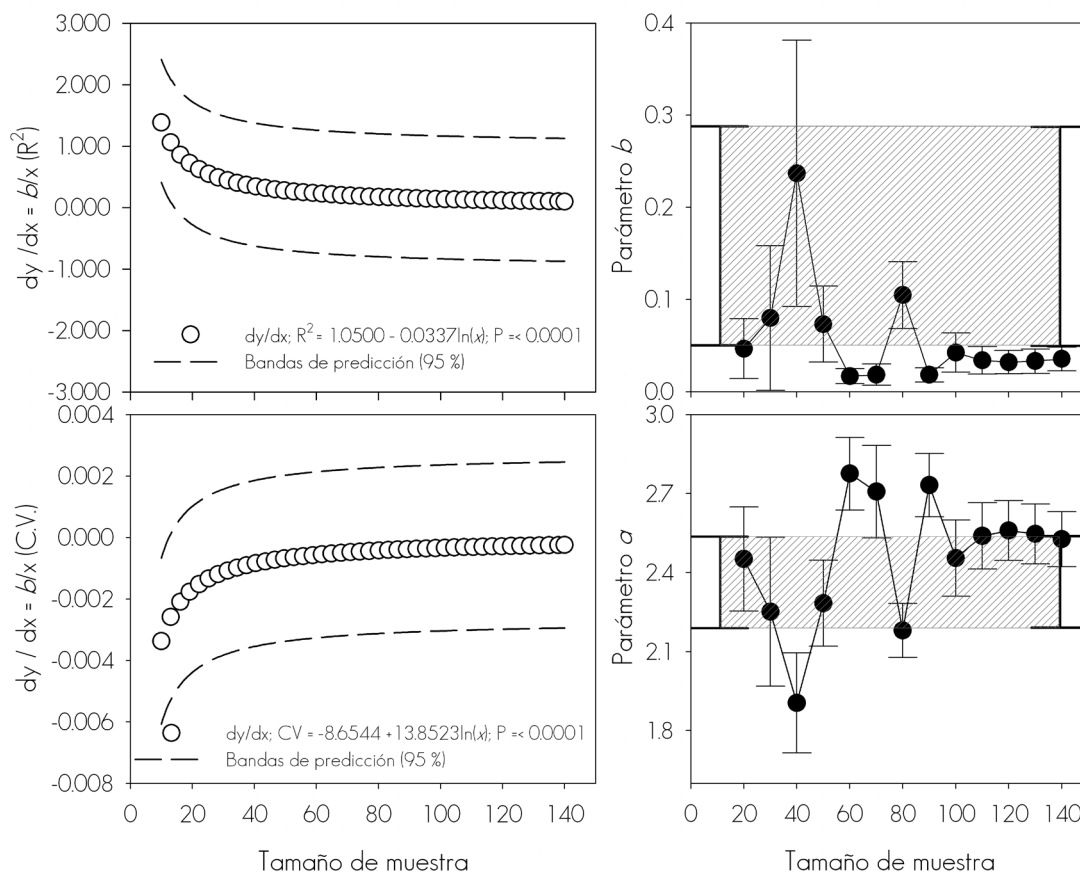
No obstante, para magnificar la tendencia se obtuvo la primera derivada del modelo:

$$dy/dx = b/x.$$

Los resultados revelan una estabilización de ambos estadísticos (R^2 y CV), cuando n se aproxima a 40 (Figura 5), es decir, con $n > 40$ se obtienen los mejores ajustes del modelo para cuantificar biomasa aérea total de *Prosopis laevigata*. La varianza mínima, representada por el error de a y b (barras, figuras 5C y 5D), disminuye después de $n = 40$ y se mantiene constante después de este valor. Al respecto, Brown *et al.* (1989) documentaron estudios de biomasa de cuatro y cinco árboles; mientras que,

$$dy/dx = b/x.$$

Results show a stabilization of both statistics (R^2 and CV) when n approaches 40 (Figure 5); in other words, when $n > 40$ it is possible to obtain the best adjustments of the model for quantifying the total aerial biomass of *Prosopis laevigata*. The minimal variation, represented by the error of a and b (bars, figures 5C and 5D) decreases after $n = 40$ and remains constant after this value. On this subject, Brown *et al.* (1989) have documented studies of biomass of four and five trees, whereas Zianis *et al.* (2005) reported that, in Europe, from over 600 models generated for estimating the biomass, 30% are used with samples that range from 11 to 20 trees. By analyzing this same relation (Figure 5) with over 594 data of biomass, Návlar (2010) indicates that the ideal sample size for building models is 60 trees.



Área sombreada en C y D indica media de b y $a \pm$ error (Zianis y Mencuccini, 2004).

Shadow area in C and D indicates mean of b and $a \pm$ error (Zianis and Mencuccini, 2004).

Figura 5. Relación entre tamaño de muestra y R^2 (A) y CV (B), parámetro b (C) y a (D) obtenidos de siete poblaciones de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. en el norte-centro de México.

Figure 5. Relation between sample size and R^2 (A) and CV (B), parameters b (C) and a (D) obtained from seven populations of *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. in the north-central part of Mexico.

Zianis *et al.* (2005) registraron que en Europa, de más de 600 modelos generados para estimar la biomasa, 30% utilizan entre 11 y 20 árboles. Al analizar esta misma relación (Figura 5) con más de 594 datos de biomasa, Návar (2010) indica que el tamaño de muestra ideal para construir modelos es de 60 árboles.

Teoría fractal ($b = 2.67$)

Se generó la hipótesis de que la media de b de la relación alométrica $y = a \cdot x^b$ es 2.67 ($\sim 8/3$) (Enquist *et al.*, 1998; Zianis y Mencuccini, 2004; Návar, 2010). Se realizaron pruebas de "t" para una media de dos colas (95%) con la finalidad de probarla para un posible uso de b en futuras estimaciones de biomasa y, por ende, en *Prosopis* spp. El promedio del parámetro b de la ecuación 1, el cual usó diferente n de esta investigación fue de 2.4436 ± 0.240 (Cuadro 4). La prueba de "t" aportó información suficiente para aceptar la hipótesis nula:

$$\mu_1 - \mu_2$$

Donde:

$\mu_1 = b$ de este estudio y

$\mu_2 = b$ de otros estudios.

Lo anterior demostró que es similar ($t = 1.032$; $P = 0.3035$) al parámetro b de Smith y Brand (1983), 2.4925 ± 0.6955 , estimado a partir de 215 modelos para 98 especies de herbáceas y arbustivas de Estados Unidos de América y Canadá; igual ($t = 1.199$; $P = 0.2520$) al citado por Zianis y Mencuccini (2004), 2.3679 ± 0.016 , calculado en 279 estudios de biomasa y semejante al registrado por Návar (2009) 2.3785 ± 0.051 en 78 ecuaciones alométricas ($t = 0.025$; $P = 3239$) de grupos de especies localizadas en América Latina. No obstante, este y otros trabajos, demuestran que b es diferente ($t = -3.53$; $P = 0.0037$) al valor 2.67 expuesto en la teoría fractal (Enquist *et al.*, 1998).

CONCLUSIONES

El diámetro basal está correlacionado de manera importante con la biomasa aérea de *Prosopis laevigata*; por lo tanto, puede usarse para estimar almacenes de carbono en la región de estudio y en *Prosopis* spp.

El modelo no-lineal sobreestima la biomasa de *Prosopis laevigata* en árboles de mayores dimensiones, al contrario de lo que ocurre con el modelo lineal; de tal forma que, se recomienda usar este último; además de, que su transformación y la aplicación del FC incrementa la validez estadística del modelo. El FC aplicado al modelo lineal incrementó las estimaciones de biomasa en más de 5%.

Existen diferencias en las características dasométricas entre sitios y, en consecuencia, en las curvas de biomasa, por

Fractal theory ($b = 2.67$)

We generated the hypothesis that the means of b in the allometric relation $y = a \cdot x^b$ is 2.67 ($\sim 8/3$) (Enquist *et al.*, 1998; Zianis y Mencuccini, 2004; Návar, 2010). We carried out "t" tests for a mean of two tails (95%), in order to prove it for a possible use of b in future biomass estimations and, therefore, in *Prosopis* spp. The average of parameter b in equation 1, which used a different n from that of this research, was 2.4436 ± 0.240 (Table 4). The "t" test provided enough information for accepting the following null hypothesis:

$$\mu_1 - \mu_2$$

Where:

$\mu_1 = b$ from this study, and

$\mu_2 = b$ from other studies.

This showed that is similar ($t = 1.032$; $P = 0.3035$) to Smith and Brand's parameter b (1983), 2.4925 ± 0.6955 , estimated from 215 models for 98 herb and shrub species in America and Canada; it is equal ($t = 1.199$; $P = 0.2520$) to that mentioned by Zianis and Mencuccini (2004), 2.3679 ± 0.016 , calculated in 279 biomass studies; and it is also equal to the one registered by Návar (2009) 2.3785 ± 0.051 in 78 allometric equations ($t = 0.025$; $P = 3239$) of groups of species located in Latin America. However, this and other studies show that b is different ($t = -3.53$; $P = 0.0037$) to the value of 2.67 exposed in the fractal theory (Enquist *et al.*, 1998).

CONCLUSIONS

Basal diameter is closely correlated to the aerial biomass of *Prosopis laevigata*; therefore, it can be used for estimating carbon storage in the studied region and in *Prosopis* spp.

The non-linear model overestimates the biomass of *Prosopis laevigata* in trees of higher dimensions, contrary to what happens in the linear model. Thus, we recommend the use of the latter, because its transformation and the application of the FC increase the statistic validity of the model. The FC applied to the linear model increased the biomass estimations in over 5%.

Differences in the mensuration characteristics of sites were observed, which consequently produced differences in the biomass curves. Therefore, we suggest that the specific equation for each site is applied, despite the appropriate adjustment of the global model.

The parameter (a and b) and statistical (R^2 and CV) analysis of the model of the n function indicates that the best adjustment is obtained when $n > 40$, which could be the optimal size for building allometric models in the case of the genus *Prosopis*.

lo que se sugiere que, a pesar del buen ajuste del modelo global, se aplique la ecuación específica del sitio.

El análisis de parámetros (a y b) y estadísticos (R^2 y CV) del modelo en función de n indica que el mejor ajuste se obtiene con $n > 40$, el cual pudiera ser el tamaño óptimo para construir modelos alométricos en el género *Prosopis*.

El parámetro b (2.4436 ± 0.240) de *Prosopis* spp. calculado en la presente investigación es diferente a lo expuesto en la teoría fractal, pero similar al de la mayoría de las especies documentadas en la literatura. 

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Sectorial CONAFOR - CONACYT, Proyecto clave "Generación validación y/o desarrollo de tecnología para el manejo sustentable de la cadena productiva del mezquite en la región norte centro de México." Clave: 115942. A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por el apoyo complementario para el análisis de datos.

REFERENCIAS

- Beedlow, P. A., D. T. Tingey, D. H. Phillips, W. E. Hogsett and D. M. Olszyk. 2004. Rising atmospheric CO₂ and carbon sequestration in forests. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2 (6):315-322.
- Brown, S. 1997a. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Congreso Forestal Mundial. Antalya Turquía. (1):107-116.
- Brown, S. 1997b. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. FAO Forestry Paper 134. Rome Italy 55 p.
- Brown, S., A. J. R. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*. 35(4):881-902.
- Burkart, A. 1976. A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). *Journal of the Arnold Arboretum*. 57(3):217-249.
- Chave, J., R. Condit, S. Aguilar, A. Hernández, S. Lao and R. Pérez. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B. Biological Science*. 359:409-420.
- Enquist, B. J., J. H. Brown and J. B. West. 1998. Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature*. 395:163-165.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2011. Situación de los bosques del mundo. Roma, Italia. 64-66 pp.
- Gaillard de Benitez, C., M. Pece, M. de Juárez, S. Vélez, A. Gómez y M. Zárate. 2002. Determinación de funciones para la estimación de biomasa aérea individual en Jarilla (*Larrea divaricata*) de la provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Foresta Veracruzana*. 4 (2):23-28.
- García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. México.
- Iglesias, M. R. y A. H. Barchuk. 2010. Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido (Argentina). *Ecología Austral*. 20(1):71-79.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990. Hipsometría. Extraído de Hipsometría y Batimetría. Atlas Nacional de México. Vol. I. Escala 1:4 000 000. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F. México.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1995. Edafología. Escalas 1: 250 000 y 1:1 000 000. México.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. Van Der Linden, X. Dai, K. Maskell and A. Johnson (Eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA. 881 p.
- Litton, C. M. and J. B. Kauffman. 2008. Allometric models for predicting aboveground biomass in two widespread woody plants in Hawaii. *Biotropica*. 40 (3):313-320.
- López F., F. M. Gaycoolea, M. A. Valdéz y A. M. Calderón. 2006. Goma de mezquite: una alternativa de uso industrial. *Interciencia*. 31 (3):83-189.
- Masera O., R., M. J. Ordoñez and R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican Forests: Current Situation and Longterm Scenarios. *Climatic Change*. 35 (3):265-295.
- Méndez G., J., A. Santos, J. A. Nájera y V. González. 2006. Modelos para estimar volumen y biomasa de árboles individuales de *Prosopis glandulosa*, var. *torreyana* en el Ejido Jesús González Ortega No 1, Mpio. de Mexicali, B.C. *Agrofaz*. 6 (2):226-235.
- Mendoza P., A. and L. Galicia. 2010. Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry*. 83 (5):497-506.
- Návar J., E. Méndez, A. Nájera, J. Graciano, V. Dale and B. Parresol. 2004. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments*. 59:657-674.
- Návar, J. 2009. Biomass component equations for Latin American species and groups of species. *Annals Forest Science*. 66(2): 208-216.
- Návar, J. 2010. Alometría para biomasa en especies arbóreas del noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 12:507-519.
- Palacios, R. A. 2006. Los mezquites Mexicanos: biodiversidad y distribución geográfica. *Boletín de la Sociedad Argentina Botánica*. 41 (1-2):99 -121.
- Pasiecznik, N. M., P. J. C. Harris and S. J. Smith. 2004. Identifying tropical *Prosopis* species: A field guide. HDRA Publishing. Coventry, UK. 29 p.
- Peters, G. P., G. Marland, C. Quéré, T. Boden, J. G. Canadell and M. R. Raupach. 2011. Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008-2009 global financial crisis. *Nature Climate Change*. 2:2-4.
- Prentice, I. C., M. Heimann and S. Stich. 2000. The carbon balance of terrestrial biosphere: Ecosystem models and atmospheric observations. *Ecology applied*. 10:1553-1573.

The b parameter (2.4436 ± 0.240) of *Prosopis* spp. calculated in the current research is different to that exposed in fractal theory, but is similar to that previously documented by others for most species. 

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Fondo Sectorial CONAFOR - CONACYT, Proyecto clave "Generación validación y/o desarrollo de tecnología para el manejo sustentable de la cadena productiva del mezquite en la región norte centro de México." Clave: 115942, as well as the la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro for their complementary support in data analysis.

End of the English version



- Rosales S., R., L. M. Valenzuela, J. C. Ríos, R. Jiménez y J. M. Ibarra. 2011. Diversidad genética en poblaciones naturales de mezquite del norte-centro de México. In: Ríos S., J. C., R. Trucíos, L. M. Valenzuela, G. Sosa y R. Rosales (Eds.). Importancia de las poblaciones de mezquite en el norte-centro de México. Libro Técnico. No. 8. INIFAP, CENID - RASPA, Gómez Palacio Durango. Dgo, México. 220 p.
- Rzedowski, J. 1988. Análisis de la distribución geográfica del complejo *Prosopis* (Leguminosae, Mimosoideae) en Norteamérica. *Acta Botánica Mexicana*. 3:7-19.
- System Statistical Analysis (SAS). 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Schlegel, B., J. Gayoso y J. Guerra. 2000. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. FONDEF- UACH- INFOR. Valdivia, Chile. 20 p.
- Smith, W. B. and G. J. Brand. 1983. Allometric biomass equations for 98 species of herbs, shrubs and small trees. U. S. Forest Service. Research Note: NC-299. Saint Paul. MN. USA. 8p.
- Soon, W., S. L. Baliunas, A. B. Robinson and Z. W. Robinson. 1999. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide. *Climate Research*. 13:149-164.
- Sprugel, D. G. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*. 64 (1):209-210.
- Tausch, R. J. 1989. Comparison of regression methods for biomass estimation of sagerrush and runchgrass. *Great Basin Naturalist*. 49 (3):373-380.
- Ward, J. H. Jr. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical Association*. 58:236-244.
- Zianis, D. and M. Mencuccini. 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*. 187:311-332.
- Zianis, D., P. Muukkonen, R. Mäkipää and M. Mencuccini. 2005. Biomass and stem volume equation for tree species in Europe. *Silvia Fennica*, Monographs No. 4. Tampere, Finland. 63 p.