

Modelaje de la biomasa aérea individual y otras relaciones dendrométricas de *Prosopis nigra* Gris. en la provincia de Santiago del Estero, Argentina

Modelling functions of individual biomass and other dendrometric relations of Prosopis nigra in the province of Santiago del Estero, Argentina

Gaillard de Benítez C.¹; M. Pece; M. Juárez de Galíndez y M. Acosta

Recibido en junio de 2013; aceptado en mayo de 2014

RESUMEN

La cantidad de biomasa de un ecosistema es un indicador del carbono que fija. El algarrobo negro (*Prosopis nigra*) integra, en distintas proporciones según el sitio, el vuelo del Parque Chaqueño seco. La utilización de funciones para estimar la biomasa aérea individual en árboles en pie simplifica en gran medida la tarea del cálculo de biomasa del ecosistema. En este trabajo se presentan funciones de una y dos variables explicativas para esta especie, las que fueron determinadas mediante regresión simple y múltiple. El estudio de la homogeneidad de regresiones entre los sitios indicó que se puede usar una única ecuación para ambos. El cociente entre el diámetro mayor y su perpendicular no resultó dependiente del diámetro de los individuos, al igual que la altura de fuste. Mediante regresiones no lineales se describe la variación, en función del diámetro, de los porcentajes de los compartimentos de biomasa (hojas, ramas de menos de 5 cm de diámetro, ramas de más de 5 cm y fuste).

Palabras claves: Funciones de biomasa; Porcentaje de componentes de biomasa; Parque Chaqueño seco.

ABSTRACT

The biomass amount of an ecosystem indicates the carbon that it fixes. Black mesquite (*Prosopis nigra*) integrates the canopy of the dry Chaco Forest, in diverse proportions. The use of functions to estimate trees aerial individual biomass allows calculating ecosystem biomass. One and two explicative functions calculated using single and multiple regression are presented. The homogeneity of regressions between sites showed that a common equation can be used. The quotient between the greatest crown diameter and its perpendicular not depend on tree diameter, as well as trunk height. The relation of biomass compartments (leaves, branches minor than 5 cm of diameter, branches with more than 5 cm and trunk) with tree diameter were estimated using no lineal regressions.

Key words: Fitting; Biomass equations; Compartments biomass percent; Dry Chaco Forest.

¹ Cátedra de Estadística. Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano 1912 (s). 4200 Santiago del Estero. Argentina. E-mail: mailto:benitez@unse.edu.ar.

1. INTRODUCCIÓN

La cantidad de carbono fijada por un bosque es aproximadamente la mitad del resultado de la suma de las biomásas de los individuos que lo integran. La biomasa de un ecosistema proporciona información para la conservación y manejo del mismo, en especial para aquellas formaciones naturales alteradas por el hombre. El conocimiento de la cantidad de carbono fijado es esencial para otros estudios básicos como lo es el ciclo de nutrientes. La estimación de la biomasa aérea arbórea se puede hacer a partir del vuelo (por ejemplo sobre la base de datos de volumen comercial por ha obtenidos en inventarios forestales) o como la suma de las biomásas individuales. La determinación exacta por pesada de la biomasa aérea de un árbol es costosa, por lo cual es recomendable la obtención de funciones que la estimen utilizando variables explicativas de fácil medición como el diámetro a la base, el diámetro a la altura del pecho, la altura total y otras (Parresol, 1999). También es interesante saber cómo se distribuye la biomasa entre sus componentes: hojas, ramitas, ramas y tronco, en especial las dos primeras cuando la especie sirve de forraje.

A partir de la primera mitad del siglo pasado, se realizaron numerosos trabajos para la estimación de biomasa de árboles en pie. Estos comenzaron motivados por la necesidad de medir la productividad biológica de las especies arbóreas y fueron dirigidos principalmente a bosques templado-fríos (Van Laar y Akça, 1997). Sin embargo, los antecedentes referidos a funciones para estimar biomasa aérea individual, son escasos para formaciones boscosas en regiones áridas y semiáridas. El algarrobo negro (*Prosopis nigra*) es una especie presente en las formaciones boscosas del Chaco semiárido. Es un árbol de la familia Leguminosae, subfamilia Mimosoideae, tribu Mimoseae. Junto al algarrobo blanco (*P. alba*) y otras especies del género, constituyen una importante fuente de recursos para los pueblos de zonas áridas y semiáridas sudamericanas. Según Roig (1993) estas especies han sido utilizadas por los pueblos originarios desde hace casi 8.000 años en múltiples usos: forrajero, medicinal, tintóreo y madera. Crece en el centro y norte de la Argentina y junto con el algarrobo blanco (*P. alba*), constituyen el “árbol” por excelencia de la región (Giménez *et al*, 2000). Los ejemplares alcanzan de 4 a 10 m de altura y diámetro de hasta 50 cm y 80 cm (FAO, 2000). Es un árbol poco tolerante a la sombra, de follaje caduco, que comienza a caer con las primeras heladas (junio o julio) y se renueva con las primeras lluvias o los aumentos de temperatura en setiembre. La copa tiene forma semiesférica, levemente aparaguada y su proyección se aproxima a un círculo.

Como antecedentes de modelos para predecir biomasa individual se pueden citar los trabajos de Gaillard de Benítez *et al* a y b (2002) para quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) y jarilla (*Larrea divaricata*). En el primero, una especie arbórea, se seleccionó el modelo alométrico constante con la variable diámetro a la altura de pecho como explicativa para estimar la biomasa aérea individual. Se usó el método de mínimos cuadrados no lineales ponderados, diferenciando por sitios mediante una variable “dummy” multiplicativa en la forma exponencial. Las ponderaciones fueron usadas para lograr la homocedasticidad de los residuos ya que la heterocedasticidad es un problema usual siempre que se representa la biomasa total en función de alguna o algunas de las variables que describen la magnitud del individuo (Parresol, B. 1999). Iglesias y Barchuk (2010) presentan modelos de regresión para estimar la biomasa aérea total de seis especies arbustivas y arbóreas de la familia Fabaceae, nativas del Chaco Árido entre los que se encuentran *Prosopis flexuosa* y *Prosopis torquata*. Los modelos incluyeron distintas combinaciones del diámetro a la base (DAB), su cuadrado y la altura de los individuos, siendo los mejores modelos aquellos que utilizan el cuadrado del diámetro a la base; la incorporación en el modelo de la altura total no proporcionó mejoras en la predicción.

Acosta Mireles *et al* (2002) trabajaron con 6 especies arbóreas de 3 localidades en México y utilizaron una prueba F para evaluar la homogeneidad de las regresiones ajustadas en las distintas localidades. Hierro *et al* (2000) construyeron funciones para la estimación de biomasa aérea en 8 arbustos de la región del Monte, Argentina. En la mayoría de los casos, el modelo logarítmico natural con una sola variable independiente fue el que mejor describió esta relación.

La medida más fácil de tomar en el campo en 6 de las 8 especies estudiadas fue el diámetro de la rama más larga, la que, en la mayoría de los casos, fue la que mejor predijo la biomasa de los arbustos. Risio Allione *et al.* (2012) determinaron funciones para estimar la biomasa individual total (aérea y radicular) de *Prosopis caldenia* utilizando como variables independientes la sección normal y la altura. Méndez González *et al.* (2006) estimaron funciones del diámetro a la base para la biomasa aérea total por componente de *P. glandulosa* en México y la variación porcentual del peso verde.

Las funciones utilizadas y seleccionadas en la literatura son muy variadas como también lo son las variables explicativas usadas y las expresiones de los errores. Los objetivos de este trabajo son construir funciones para: Estimar la biomasa aérea individual de ejemplares de *Prosopis nigra* en pie utilizando variables explicativas de fácil medición, describir la forma de la copa y la relación de altura de fuste y altura total con el diámetro, describir el comportamiento de los porcentajes de los componentes de biomasa en función del diámetro

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Características de los sitios de estudio

Las mediciones se relevaron en dos sitios que se encuentran en el Parque Chaqueño Seco. La María, a los 28° 01' de latitud Sur y 64° 17' de longitud Oeste, es el campo experimental del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), ubicado a 30 km al sur de la ciudad de Santiago del Estero, en la zona de transición de la llanura aluvial del Río Dulce y la planicie pedemontana de las Sierras de Guasayán (Lorenz, 1995). El segundo sitio Monte Quemado (Rincón del Valle, a 10 km al sur de la localidad de Monte Quemado sobre la ruta provincial N° 92) ubicado a 25° 50' S y 62° 49' O. Ambas localidades forman parte de una planicie loésica. Se trata de suelos ligeramente evolucionados con un perfil típico A-C-AC, poco profundos sin estructura o débilmente estructurados. No presentan un horizonte de acumulación de arcilla, la textura es franco limosa y poseen buen drenaje.

El clima es continental con veranos muy calurosos (hasta 45° C) e inviernos fríos (hasta -10° C). Las precipitaciones, dentro de la Provincia de Santiago del Estero, varían de Noreste a Sudoeste (cerca de 800 mm anuales en Monte Quemado a 550 mm anuales en La María) con distribución estacional, comenzando a fines de la primavera y finalizando en el otoño. El balance hídrico es negativo durante todo el año (Boletta, 1988). La vegetación corresponde a los bosques de quebracho, donde predominan los quebrachos colorado (*Schinopsis lorentzii*) y blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*). La intensa explotación forestal y el pastoreo han transformado los bosques dejándolos empobrecidos, aumentando la importancia de las especies secundarias como mistol (*Ziziphus mistol*), chañar (*Geoffoea decorticans*), algarrobos blanco y negro (*P. alba* y *P. nigra*) y otras que constituyen un segundo estrato arbóreo. El estrato arbustivo también aumentó su riqueza y cobertura.

El bosque existente en el paraje Rincón del Valle (Monte Quemado) corresponde a un monte explotado, que se encuadra en lo que Thren (1994) clasifica como bosque tipo 2 y denomina bosque en regeneración y al que Brassiolo (1997) adjudica un área basal de 8 m²/ha con una densidad de 390 árboles por ha de los cuales 40 son quebrachos colorados, 120 blancos, con una altura media de 8,5 m y el resto se presenta en un segundo estrato arbóreo más bajo, con predominancia de mistol (*Ziziphus mistol*) y presencia de *Prosopis nigra* y otras especies.

El bosque de La María tiene área basal de 6,76 m²/ha y 317 árboles por ha de los que 17,5 corresponden a la especie que es motivo de este estudio. El aporte de *Prosopis nigra* al área basal es de 0,32 m²/ha (Araujo *et al.*, 2008).

Selección, medición y pesaje en campo de los árboles

La selección de los 30 árboles apeados (15 en cada localidad) se hizo aleatoriamente. Las clases diamétricas (10 a 20, 20 a 30, 30 a 40, 40 a 50 y 50 cm ó más) constituyeron los estratos en cada uno de los cuales se eligieron tres individuos. El procedimiento consistió en ubicar al azar un punto en el bosque y buscar en sus alrededores un ejemplar sano de una determinada clase diamétrica. Los rangos de diámetro abarcados fueron de 13 a 52,8 cm en Monte Quemado y de 17,1 a 57,6 cm en La María.

En los ejemplares en pie se midieron las siguientes variables: diámetro a la altura de pecho (d) en cm, altura total (h_t) en m, altura de fuste (h_f) en m (hasta la primera bifurcación), altura de copa (h_c) en m, diámetro mayor de copa en m y su perpendicular, al que se designó como diámetro de copa menor. Los árboles fueron cortados, separados y pesados sus componentes: fuste, ramas (de 5 cm de diámetro ó más), ramitas (de menos de 5 cm), hojas (en forma conjunta con ramillas ya que resulta muy difícil separar las hojas de las ramillas muy delgadas).

La altura de la copa (h_c) corresponde a la longitud de la copa verde y se calculó por diferencia entre la altura total y la altura de la rama verde más baja. El diámetro de la copa (d_c) se obtuvo como la media geométrica de los dos diámetros medidos. Para cuantificar la forma de la copa se calculó para cada individuo la razón (r_c) entre el diámetro mayor y el menor.

Para pesar los distintos componentes en el campo se utilizaron: una balanza de plataforma (hasta 150 kg con precisión de 100 gramos) en la que se pesó como mínimo 5 kg y una balanza tipo pilón (hasta 50 kg con precisión de 250 gramos) para pesos desde 12 kg. Esta balanza permite colgar los elementos a pesar y por ello resulta apropiada para los paquetes de ramas los que, por su forma y volumen, no se pueden pesar en la balanza de plataforma. Para los pesos menores de 5 kg, se llevó el material al laboratorio y se pesó con balanza de precisión.

Determinación del peso seco

La estimación de los pesos secos de los distintos componentes de cada individuo se realizó mediante estimadores de razón (R). Para su determinación se tomaron muestras que fueron pesadas con balanza de precisión y secadas hasta peso constante en estufa a 105 °C. La razón R_{ij} correspondiente al i -ésimo componente del j -ésimo individuo, se estimó de la siguiente manera:

$$\hat{R}_{ij} = \frac{psm_{ij}}{phm_{ij}}$$

Donde:

psm_{ij} = peso seco de la muestra del i -ésimo componente del j -ésimo individuo,

phm_{ij} = peso húmedo de la muestra del i -ésimo componente del j -ésimo individuo.

A diferencia del procedimiento dado por Brown (1997) quien recomienda tomar varias muestras de cada componente, calcular un valor de R en cada una de ellas y utilizar la media aritmética de esas razones, aquí se utilizó un único valor de R para cada componente e individuo obtenido mediante el cociente de la suma de los pesos secos y la suma de los pesos húmedos, por considerar que para esta situación es apropiado el uso de un estimador de razones por darse las condiciones recomendadas por De Vries (1986): la relación entre peso seco y húmedo es lineal y la ordenada al origen es cero.

Las muestras para el cálculo de los \hat{R}_{ij} se tomaron como sigue:

- Del fuste: un disco a la altura del tocón, otro en la mitad del fuste y el restante en el extremo superior.

- De las ramas (de más de 5 cm de diámetro): cinco discos provenientes de ramas de diferentes diámetros.
- De las ramitas (de menos de 5 cm de diámetro) se eligieron ramas de los distintos diámetros hasta un peso de aproximadamente 500 g.
- Del follaje se separaron unos 200 g.

Una vez obtenido \hat{R}_{ij} , se procedió a la estimación del peso seco del *i*-ésimo componente del *j*-ésimo individuo ($\hat{P}_{S_{ij}}$):

$$\hat{P}_{S_{ij}} = \hat{R}_{ij} Ph_{ij}$$

Donde:

Ph_{ij} es el peso húmedo total de dicho componente en el individuo *j*.

El peso seco total de cada árbol se obtuvo sumando todos los componentes.

Los meses de toma de muestra fueron en Monte Quemado, octubre y mayo y en La María, abril, mayo y junio.

Métodos estadísticos

Una vez calculados en gabinete los pesos secos se procesaron los datos usando el software estadístico INFOSTAT ver. 2011 (Balzarini *et al* 2008) en especial los procedimientos de regresión lineal y no lineal, simple y múltiple. Para la selección de variables explicativas en ésta última, se utilizó el procedimiento Stepwise con α de 0,05. En el modelaje del porcentaje de ramas en función del diámetro se utilizaron los modelos alométrico, de Gompertz y monomolecular (Tabla 1)

Tabla 1. Modelos utilizados para estimar el porcentaje de ramas en función del diámetro

Nombre	Ecuación
Alométrico	$y = \alpha d^{\beta}$
Gompertz	$y = \alpha e^{-\beta e^{-\gamma x}}$
Monomolecular	$y = \alpha(1 - \beta e^{-\gamma x})$

El análisis de la variancia fue usado para probar igualdad de medias entre sitios. En todos los casos se comprobó el cumplimiento de los supuestos que validan las pruebas estadísticas. La normalidad de los errores se comprobó con la prueba de Shapiro-Wilks modificada (Balzarini *et al*, 2008) y la homogeneidad de variancias con la prueba de Levene (Balzarini *et al*, 2008) utilizando las clases diámetricas como factor de agrupamiento. Para saber si es necesario utilizar una ecuación para cada localidad se empleó el procedimiento recomendado por Montgomery (2002), basado en la siguiente prueba F

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \hat{y}_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n_{LM}} (y_{oi} - \hat{y}_{iLM})^2 + \sum_{i=1}^{n_{MQ}} (y_{oi} - \hat{y}_{iMQ})^2 \right)}{(v - (v_{LM} + v_{MQ}))}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_{LM}} (y_{oi} - \hat{y}_{iLM})^2 + \sum_{i=1}^{n_{MQ}} (y_{oi} - \hat{y}_{iMQ})^2}{v_{LM} + v_{MQ}}$$

Donde:

$\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \hat{y}_i)^2$ es la suma de cuadrados de los residuos de la regresión única, $\sum_{i=1}^{n_{LM}} (y_{oi} - \hat{y}_{iLM})^2$ es la suma de cuadrados de los residuos de la regresión en La María, $\sum_{i=1}^{n_{MQ}} (y_{oi} - \hat{y}_{iMQ})^2$ es la suma de cuadrados de los residuos de la regresión en Monte Quemado, v los grados de libertad correspondientes a la regresión única y v_{LM} y v_{MQ} los grados de libertad de las regresiones en cada sitio.

Como indicadores de la bondad de los ajustes, además de R^2 ajustado y el índice de Akaike (AIC) se utilizaron:

- Error medio: $EM = \frac{\sum_j (y_{oj} - \hat{y}_j)}{n}$;
- Error medio porcentual: $EM\% = \frac{100EM}{\bar{y}_o}$;
- Error medio cuadrático: $EMC = \sqrt{\frac{\sum_j (y_{oj} - \hat{y}_j)^2}{n - k}}$;
- Error medio cuadrático porcentual: $EMC\% = \frac{100EMC}{\bar{y}_o}$
- Error absoluto medio: $EMA = \frac{\sum_j |y_{oj} - \hat{y}_j|}{n}$;
- Error absoluto medio porcentual: $EMA\% = \frac{100EMA}{\bar{y}_o}$

Donde y_{oj}, \hat{y}_j son los valores de biomasa observados y predichos con la función seleccionada e \bar{y}_o es la media observada de peso seco total (Parresol, 1999).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para describir las características de los árboles de los dos sitios, se calcularon los promedios de las distintas variables y de las contribuciones porcentuales de los componentes. Los estadísticos de resumen de las variables más relevantes a este estudio se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores medios, coeficientes de variación y valores mínimos y máximos de las variables dasométricas en 30 árboles de *Prosopis nigra*

Variable	Media	CV	Mín	Máx
d (cm)	34,71	42,82	11,7	59,8
h _t (m)	9,17	19,53	5,5	12
h _f (m)	1,87	27,48	1,3	3,25
Dcmayor (m)	11,94	30,18	5,32	17,0
dcmenor (m)	10,08	28,36	3,7	15,8
r _c	1,20	12,13	1,0	1,44
pst (kg)	819,93	79,73	40,58	2190,61
por _h	2,64	73,05	0,65	8,92
por _{ra}	38,45	26,01	22,53	64,75
por _r	43,1	31,14	12,14	66,43
por _f	15,81	46,76	7,87	37,97

Abreviaturas: d: diámetro de copa, r_c: razón de diámetros de copa; por_h, por_{ra}, por_r y por_f: porcentajes de hojas, ramitas, ramas y fuste respectivamente

Mediante análisis de la variancia se compararon las medias aritméticas de los sitios de algunas de las variables y de r_c (razón entre el diámetro de copa mayor y el menor). Los resultados de estas pruebas y las correlaciones con el diámetro y el peso seco total se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de pruebas F entre medias de los dos sitios de las variables diámetro, altura total, altura de fuste, razón de copa, peso seco total y r₁ (correlaciones con el diámetro) y r₂ (correlaciones con el peso seco total)

Variable	F _(1,28)	p	r ₁	r ₂
d	0,05	0,8183	1	0,93
h _t	0,22	0,6414	0,84	0,79
h _f	4,57	0,0394	-0,18	0,31
pst	1,70	0,2027	0,93	1
r _c	0,17	0,6835	0,21	0,20

La única diferencia estadísticamente significativa entre las medias que se observa en la Tabla 3 corresponde a h_f. Los fustes en La María son, en promedio, casi 40 cm más altos. Esto podría explicarse por ser La María una zona de clausura desde hace más de 30 años durante los cuales no hubo aprovechamiento. En Monte Quemado se podría suponer que los mejores fustes han sido cortados para ser utilizados por los pobladores de la zona.

La correlación de la biomasa con el diámetro (r₁) es mayor que la que existe con las otras variables (Tabla 3). Las relaciones de las variables de la Tabla 3 con el diámetro se representan gráficamente en las Figuras 1, 2, 3, y 4. En ellas se observa que la altura total y la biomasa muestran una marcada tendencia ascendente, mientras que son prácticamente inexistentes entre la h_f y r_c. Esto último es confirmado con los coeficientes de correlación (r₁) de la Tabla 3 y que expresarían la diversidad de h_f y r_c en individuos de igual diámetro.

La Figura 4 y la ausencia de correlación entre la razón de copa y el diámetro (r₁= 0,21) indicarían una tendencia hacia una copa cuya proyección es levemente elipsoidal y que demuestra no estar influenciada por el diámetro, variando alrededor del promedio r_c=1,2.

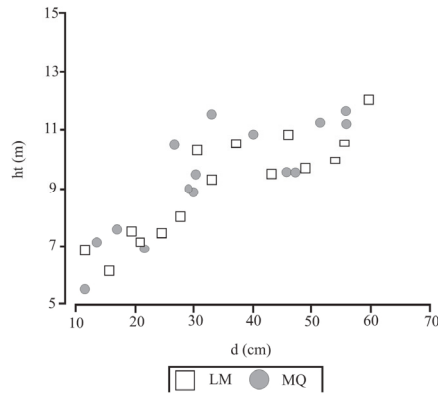


Figura 1. Altura total en función del diámetro.
LM: La María; MQ: Monte Quemado

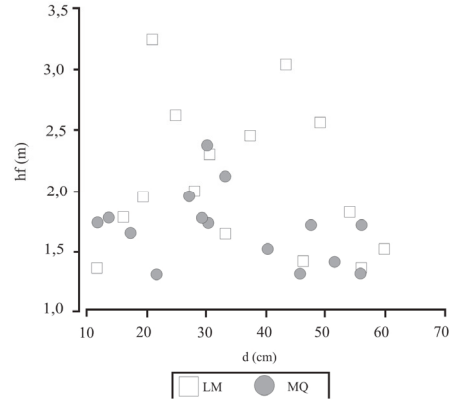


Figura 2. Altura de fuste en función del diámetro.
LM: La María; MQ: Monte Quemado

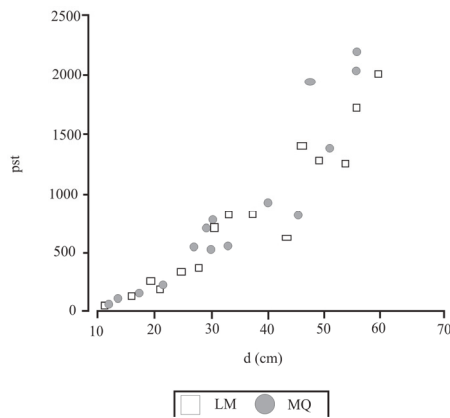


Figura 3. Biomasa en función. del diámetro
LM: La María; MQ: Monte Quemado

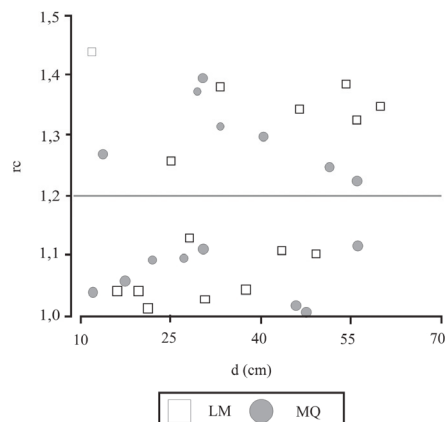


Figura 4. Razón de copa en función del diámetro
LM: La María; MQ: Monte Quemado

Por ser el diámetro la variable de mayor correlación con la biomasa (Tabla 3) se la eligió como variable explicativa en las regresiones simples. Según lo sugiere la Figura 2 se ajusta a un polinomio de segundo orden. No se cumplió el supuesto de homogeneidad de variancias de los errores; para atender a esta problemática se evaluaron varias ponderaciones, resultando ser $1/d^4$ la adecuada. Para determinar si es necesario utilizar una función para cada sitio, se aplicó la prueba F mencionada, obteniéndose un valor $F_{c(3,27)} = 1,38$ al que le corresponde un valor de probabilidad $p = 0,30$, resultado con el cual se concluyó que se puede usar una misma función para ambos sitios. Esta se ajustó con un modelos polinómico de segundo orden y con los 30 árboles (Shapiro Wilks: $p = 0,68$; Levene: $p = 0,10$). Los coeficientes y estadísticos de la regresión ajustada se presentan en la Tabla 4 y Figura 5.

Tabla 4. Resultados de la regresión entre peso seco total y diámetro (d) con ponderación $1/d^4$; $n = 30$, $R^2 = 0,92$, $AIC = -29,24$

Coefficientes	Estimación	t	p-valor
constante	-97,966280	-1,524464	0,1390
d	6,281108	0,993868	0,3291
d^2	0,496302	3,901763	0,0006

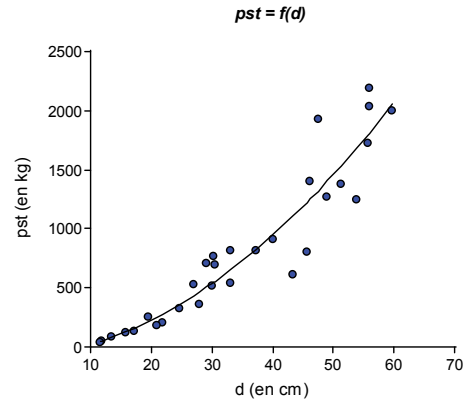


Figura 5. Valores observados y estimados del peso seco total en función del diámetro para individuos de *Prosopis nigra*

En la regresión múltiple incorporaron como posibles variables independientes a d , h_t , h_f , diámetros de copa, como también transformaciones de todas ellas y productos entre ellas. El procedimiento stepwise seleccionó una única variable, que es en una variable compuesta, d^2h_t . En esta oportunidad también fue necesaria la ponderación para lograr el cumplimiento de supuestos de normalidad y homogeneidad de variancias en los errores. Los coeficientes estimados se presentan en la Tabla 5 y su gráfica en la Figura 6.

Tabla 5. Resultados de la regresión del peso seco total en función del diámetro y la altura total con ponderación $1/d^2h_t$. $n=30$, $R^2=0,91$, $AIC=-121,75$

Coef	Estimación	t	p-valor
const	32,0443	1,2940	0,2063
d^2h_t	0,0545	17,4152	<0,0001

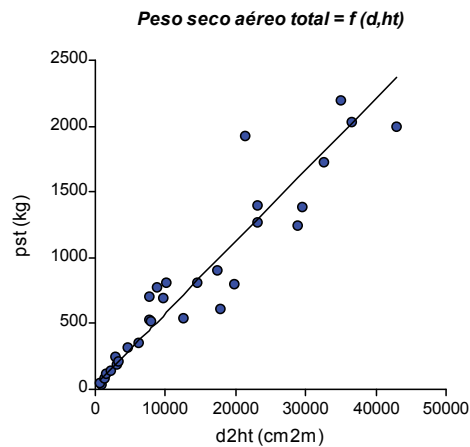


Figura 6. Valores observados y estimados del $pst = f(d^2h_t)$

Las funciones estimadas en los trabajos consultados como antecedentes son variadas, habiéndose popularizado las alométricas que utilizan una sola variable independiente, y en las que la biomasa depende generalmente del diámetro a la base o del diámetro a la altura de pecho elevado a una constante. Es opinión de los autores de este trabajo que dicha popularidad se debe a que, además del significado biológico de estas funciones, en estos ajustes se utiliza la transformación logarítmica de ambas variables, dependiente e independiente, transformación que corrige los problemas de heterocedasticidad de los errores. En este trabajo el no

cumplimiento de dichos supuestos se contempló mediante el uso de ponderaciones. Los errores cometidos con las funciones ajustadas se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Errores medios cometidos en la variable original (kg) y en % de la media

Error	Regresión simple Pst = f(d)		Regresión múltiple Pst = f(d, h ²)	
	Media (kg)	%	media (kg)	%
EM	-4,19	-0,51	0	0
EMA	150,90	18,40	148,07	18,08
EMC	231,67	28,25	229,03	27,96
R ² aj	0,92		0,91	
AIC	-29,24		-121,75	

A pesar que R² y el índice AIC indicarían que la regresión simple es la mejor, los errores de predicción cometidos con la regresión múltiple son levemente inferiores. Además, en este caso en particular, la regresión simple con un EM de -4,19 indica una pequeña sobre estimación (-0,51%) con respecto los valores observados, mientras que en la regresión múltiple este error es nulo. La regresión simple no exige la medición de la altura total. Los errores reportados en los antecedentes son los siguientes: Gaillard de Benítez *et al* (2002) para quebracho blanco, el error medio porcentual EM%= -3,1; y para jarilla un error medio absoluto porcentual, EAM%, de 7 a 24% y un error medio cuadrático porcentual, EMC%, de 6 a 31%. Iglesias y Barchuk (2010) para *P. flexuosa* y *P. torquata* informa de EMC de 37,3 a 90,3 kg, el que expresado en relación la media aritmética de la biomasa de los ejemplares estudiados (188,9 kg), representa de 20 a 48%.

Acosta Mirelles *et al* (2002) no presentan valores de los errores cometidos. Hierro *et al* (2000) reportan errores de estimación de 1030,4 g para la funciones de *Prosopis caldenia* y 1893,13 g para *P. flexuosa* var. *depressa* en individuos cuyo biomasa va de 90 a 19705 g. Risio Allione (2012) en *P. caldenia* incluidas las raíces, realizaron ajustes por separado para cada componente de biomasa y también un ajuste conjunto por el Método de Mínimos Cuadrados Generalizados Conjuntos para garantizar la aditividad entre los componentes. En el ajuste individual de biomasa total obtuvo un EMC de 23,17 kg, el que con una media de 59,5 kg representa un EMC% de 38,94%. Se observa así que los errores calculados en este trabajo están dentro del rango reportado en los antecedentes. La magnitud de los errores es alta, debido a que la variabilidad de la biomasa aumenta con las variables usadas como explicativas, por lo que el uso de estas ecuaciones no debe extenderse fuera del rango utilizado para su estimación.

Para representar la relación entre los porcentajes de cada componente y el diámetro se probaron modelos polinomiales mediante regresión lineal y, con regresión no lineal, potenciales o alométricos, de Gompertz y Monomolecular. En todos los casos se analizó la homogeneidad de regresiones entre los dos sitios, encontrándose que el porcentaje de ramas requiere una función para cada sitio en particular, este resultado sería coherente con la diferencia encontrada entre las medias de h_f. Al ser la finalidad del cálculo de las funciones de los porcentajes meramente descriptivo, no se tomaron en cuenta algunos casos aislados de incumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad en la distribución de los errores. Las funciones que mejor representaron a la relación de los porcentajes de componentes con el diámetro se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Funciones que modelan el comportamiento de los porcentajes de componentes en relación al diámetro en *Prosopis nigra*.

Componente	Modelo	Coeficientes			EMC
		a	b	c	
Hojas	$p\hat{r}_h = ad^b$	50,1114	-0,8827	-	1,5
Ramitas (<5cm)	$p\hat{r}_{ra} = ad^b$	153,3075	-0,4076	-	6,2
Ramas (≥ 5 cm) LM	$y = a(1 - be^{-cx})$	64,9092	1,0450	0,0300	5,7
Ramas (≥ 5 cm) MQ	$y = a(1 - be^{-cx})$	57,8171	1,9665	0,0904	5,9
Fuste	$p\hat{r}_f = ad^b$	48,1442	-0,3691	-	7,1

En las Figuras 7 y 8 se presentan los valores observados y estimados de los porcentajes de los componentes de la biomasa en función del diámetro. La forma de las relaciones de los porcentajes de los componentes de biomasa en función del diámetro es coincidente con lo reportado por Méndez González *et al* (2006): creciente para fuste y ramas y decreciente para hojas y ramitas. El decrecimiento porcentual del follaje indica un descenso en la productividad individual.

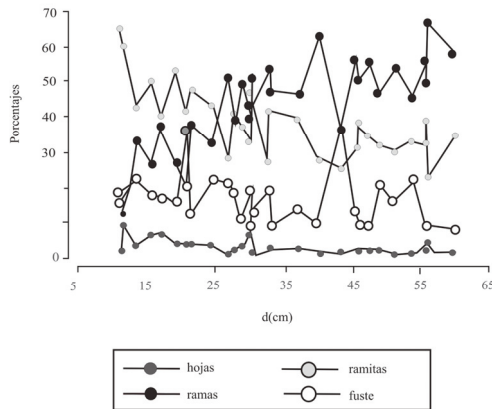


Figura 7. Porcentaje de componentes observados.

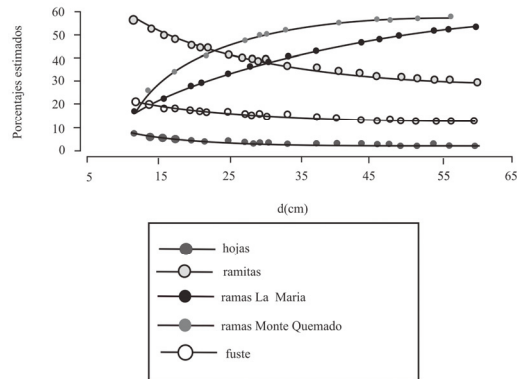


Figura 8. Porcentajes estimados.

4. CONCLUSIONES

- Las funciones que mejor estimaron la biomasa aérea individual de *Prosopis nigra* fueron $p\hat{st} = -97,9663 + 6,2811d + 0,4963d^2$ y $p\hat{st} = 32,0443 + 0,0545d^2h_i$ con R^2 de 0,92 y 0,91 respectivamente.
- Los errores medios cuadráticos porcentuales son de 28,25 y 27,96% en las regresiones simple y múltiple respectivamente con una leve sobreestimación de la primera.
- La altura de fuste no está relacionada con el diámetro.
- La proyección de la copa es levemente elipsoidal, con una razón media entre el diámetro mayor y su perpendicular, \bar{r}_c , de 1,2 y no varía con el diámetro del árbol.

- La relación entre los porcentajes de los componentes con el diámetro es coincidente con lo reportado en los antecedentes: los porcentajes de hojas y ramitas menores de 5cm son decrecientes y el de fuste y ramas mayores de 5cm son crecientes.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Mireles, M.; J. Vargas Hernández; A. Velásquez y J. Etchevers Barra. 2002. “Estimación de biomasa aérea mediante uso de relaciones alométricas en 6 especies arbóreas en Oaxaca, México”. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Araujo, P.; M. Iturre; V. Acosta y R. Renolfi. 2008. “Estructura del bosque de La María EEA INTA Santiago del Estero”. *Quebracho* 16:5-19.
- Balzarini, M. G.; L. Gonzalez; M. Tablada; F. Casanoves; J. A. Di Rienzo y C. W. Robledo. 2008. “INFOSTAT, Manual del Usuario”. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Boletta, P. E. 1988. “Capítulo I” *In* Casas R.R. “Desmonte y habilitación de tierras en la Región Chaqueña Semiárida”. Red de Cooperación Técnica en Uso de los Recursos Naturales en la Región Chaqueña Semiárida, Argentina – Bolivia – Paraguay. Santiago de Chile. p: 7-21
- Brassiolo, M. 1997. “Zur Bewirtschaftung degradierter Wälder semiariden Chaco Nordargentiniens unter Berücksichtigung der traditionellen Waldweide”. Tesis doctoral de la Facultad Forestal de la Universidad de Freiburg im Breisgau.
- Brown, S. 1997. “Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forest”. *FAO Forestry Paper* 134. Roma. 55 p.
- De Vries, P. 1986. “Sampling Theory for Forest Inventory”. Springer Verlag. Berlín-Heidelberg. 399 p.
- FAO. 2000. “Los algarrobos. Las especies del género *Prosopis* (algarrobos) de América Latina con especial énfasis en aquellas de interés económico”. Talleres Gráficos Graziani. Córdoba. Argentina. 276 p.
- Fiorentino, D. y L. Diodato. 1987. “Biología de *Criodidum angustatum* (Buquet)”. I Congreso de Entomología. Tucumán. p: 104-110.
- Gaillard de Benítez, C.; M. Pece; M. Juárez de Galíndez; A. Maldonado; V. Acosta y A. Gómez. 2002. “Biomasa aérea de ejemplares de quebracho blanco (*Apidosperma quebracho-blanco*) en dos localidades del Parque Chaqueño Seco”. *Quebracho* 9: 115-127.
- Gaillard de Benítez, C.; M. Pece; M. Juárez de Galíndez; S. Vélez; A. Gómez y M. Zárate. 2002. “Determinación de funciones para estimación de biomasa aérea individual en jarilla (*Larrea divaricata*) de la Provincia de Santiago del Estero, Argentina”. *Foresta Veracruzana*. vol 4, número 002. Universidad Veracruzana, Xalapa, México. p: 23-28.
- Giménez A. M.; G. Moglia; P. Hernández y S. Bravo. 2000. “Leño y corteza de *Prosopis nigra* (Griseb.) Hieron, Mimosaceae, en relación a algunas magnitudes dendrométricas”. *Rev. Forest. Venez.* 44(2): 29-37.
- Hierro, J.; L. Branch; D. Villareal y K. Clark. 2000. “Predictive equations for biomass and fuel characteristics of Argentine shrubs”. *Journal of Range Management*. 53: 617-621
- Iglesias, M. del R. y A. Barchuk. 2010. “Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido (Argentina)”. *Ecología Austral* 20: 71-79.
- Ledesma, M.; C. A. Carranza y M. Balzarini. 2010. “Estimación de la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* mediante relaciones alométricas”. *Agriscientia* vol. XXVI (2): 87-96
- Lorenz, G. 1995. “Caracterización ecológica de un suelo Eutric Regosol bajo bosque en el Chaco semiárido, Argentina”. *Quebracho* 3: 13-23.

- Méndez González J.; A. Santos Méndez; J. A. Nájera Luna y V. González Ontiveros. 2006. "Modelos para estimar volumen y biomasa de árboles individuales de *Prosopis glandulosa* var *torreyana* en el Ejido Jesús González Ortega N°1, Municipio de Mexicalí B.C." *Agrofaz* 6(2): 225 - 239
- Montgomery, D; E. Peck y G. Geoffrey Vining. 2002. "Introducción al Análisis de Regresión Lineal". Compañía Editorial Continental. México. 588 p.
- Parresol, B. 1999. "Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and Critical Comparasions". *Forest Science* 45(4): 573-593.
- Risio Allione, L.; F. Bravo y S. Bogino. 2012. "Cuantificación de biomasa y carbono en bosques nativos de *Prosopis caldenia* (Burkhart) en la pampa semiárida argentina" [en línea] Disponible en: <<http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/1593/1/TFM-L%2043.pdf>>
- Roig F. A. 1993. "Aportes etnobotánicos del Género *Prosopis*". Contribuciones mendocinas a la Región para América Latina y el Caribe de la Red de Forestación del CIID-IADIZA, CRICYT, CIID, Mendoza, Argentina., p: 99-119.
- Thren, M. y R. Zerda. 1994. "Inventario Forestal de la Provincia de Santiago del Estero, Departamentos Copo y Alberdi". Convenio Provincia de Santiago del Estero, Consejo Federal de Inversiones (CFI), GTZ, UNSE, Facultad de Ciencias Forestales, Asociación Cooperadora de la FCF-UNSE. 114 p.
- Van Laar, A. y A. Akça. 1997. "Forest Mensuration". Curvilier. Göttingen. 418 p.

