

Estimación de la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* mediante relaciones alométricas

Ledesma, M.; C.A. Carranza y M.Balzarini

RESUMEN

La estimación alométrica de la biomasa foliar arbórea es necesaria para determinar la producción primaria y para analizar algunas de las interacciones ecológicas entre los árboles y los demás componentes de la vegetación. El objetivo del trabajo fue ajustar y seleccionar modelos para estimar la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* a partir de variables dendrométricas. Se apearon seis árboles, se midió su diámetro y se calculó el área de albura de muestras transversales de leño, en cuatro niveles: en los órdenes de ramificación dentro de la copa viva (ramas secundarias, terciarias y cuaternarias agrupadas), en el extremo distal de las ramas primarias y en los extremos distal y basal del fuste. Se recolectaron las hojas correspondientes a cada nivel y se obtuvo el peso seco. El área de albura fue la mejor variable predictora de biomasa foliar, aunque el diámetro tuvo buen ajuste en ramas dentro de la copa viva y en ramas primarias. Los modelos calculados con variables de fuste tuvieron menor ajuste. Se concluye que para la estimación no destructiva de la biomasa foliar de plantas adultas de *Prosopis flexuosa* es recomendable utilizar el modelo basado en el diámetro distal de las ramas primarias.

Palabras clave: alometría, peso hojas, diámetro del tallo, área de albura.

Ledesma, M.; C.A. Carranza and M.Balzarini, 2010. Estimation of leaf biomass in *Prosopis flexuosa* by means of allometric relationships. Agriscientia XXVII (2): 87-96

SUMMARY

The estimation of leaf biomass, usually performed by allometric relations, is important for the interpretation of primary production and for the assessment of ecological interactions between trees and the rest of the components in a wood vegetation. The goal for the present work was to adjust and to select allometric models for the estimation of leaf biomass *Prosopis flexuosa* based on dendrometric variables. Six trees were surveyed. The diameter and sapwood area of transversal samples of wood were determined at four different levels: in the or-

ders of ramification within living crown (secondary, tertiary and quaternary grouped branches), at the distal portions of primary branches and in the apical and basal portions of bole. The leaves were collected according to each level and dry mass was obtained. The sapwood area was the best predictor of leaf biomass, although diameter provided accurate estimations within crown and at the distal portions of primary branches. The models based on trunk dimensions were less precise. It is concluded that the obtained regression model based on the diameter of the distal portions of primary branches can be applied for the non-destructive estimation of leaf biomass in *Prosopis flexuosa* adult trees.

Key words: allometry, leaf weight, stem diameter, sapwood.

M. Ledesma y C.A. Carranza. INTA, Estación Forestal Villa Dolores - EEA INTA Manfredi. Av. Illía 303. (CP 5870) Villa Dolores, Córdoba, Argentina. M.Balzarini. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. CC 509, 5000 Córdoba, Argentina. Correspondencia: intaforestal@vdolores.com.ar.

INTRODUCCIÓN

La biomasa foliar es una variable fundamental de la estructura arbórea, ya que guarda relación directa con la productividad primaria. Adicionalmente, influencia las condiciones ambientales del sotobosque al modificar la incidencia de luz, el ciclado de nutrientes y la demanda atmosférica de agua bajo el dosel (Waring, 1983; Bond-Lamberty *et al.*, 2002). Su determinación es importante, por ejemplo, en el estudio de las interacciones ecológicas que ocurren entre leñosas y pastizales en sistemas silvopastoriles. La biomasa foliar puede determinarse directamente mediante cosecha y pesado de todas las hojas, pero en el caso de árboles, la tarea resulta sumamente laboriosa, destructiva y poco práctica. Por esta razón, usualmente se estima mediante regresiones alométricas, basadas en otras dimensiones de los árboles de más fácil determinación (Zimmermann, 1983; Norman & Campbell, 1991; Lott *et al.*, 2000; Bond-Lamberty *et al.*, 2002).

La teoría del modelo de tubo (Shinozaki *et al.*, 1964) es el marco conceptual más frecuentemente usado para fundamentar las relaciones alométricas que correlacionan la biomasa foliar con variables dendrométricas. Esta teoría, vincula la transpiración que ocurre en las hojas del dosel, con la capacidad del xilema de tallos y ramas para transportar el agua que va a ser transpirada, asumiendo una relación conservativa entre estructura y función (Shinozaki *et al.*, 1964; Cruiziat *et al.*, 2002). El diámetro del fuste es una de las variables predictoras no destructivas más comúnmente usada, ya sea medido a 1,3 m del suelo en el caso de árboles de

gran desarrollo vertical (Waring, 1983; Turner *et al.*, 2000; Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Bond-Lamberty *et al.*, 2002; Meadows & Hodges, 2002), o medido a nivel de la base, en el caso de arbustos y árboles de bajo porte (Snell & Brown, 1978; Ganskopp & Miller, 1986). En otros casos, la variable predictora es el diámetro de las ramas en distintos niveles de la copa viva y en la base de la copa viva (Waring *et al.*, 1982; Waring, 1983; Margolis *et al.*, 1988; Nygren *et al.*, 1993; Shelburne *et al.*, 1993; Mencuccini & Grace, 1994; Pereira *et al.*, 1997; Lott *et al.*, 2000). Otra variable predictora muy efectiva y utilizada, aunque su determinación es más laboriosa y su muestreo causa cierto daño, es el área de albura del tallo y/o las ramas (Snell & Brown, 1978; Waring *et al.*, 1982; Waring, 1983; Whitehead *et al.*, 1984; Ganskopp & Miller, 1986; Mencuccini & Grace, 1994; Pereira *et al.*, 1997; Lambers *et al.*, 1998; Turner *et al.*, 2000; Bond-Lamberty *et al.*, 2002; Meadows & Hodges, 2002).

La incorporación de variables independientes adicionales, como la altura del árbol y el largo del tallo hasta la base de la copa viva o hasta las ramas superiores, puede mejorar la estimación (Shelburne *et al.*, 1993; Ojansuu & Maltamo, 1995; Pereira *et al.*, 1997; Bond-Lamberty *et al.*, 2002; Meadows & Hodges, 2002). La inclusión de estas variables, se fundamenta en el modelo hidráulico (Whitehead *et al.*, 1984), que vincula las áreas conductivas y la biomasa foliar con la longitud del camino del agua desde el suelo hasta la copa del árbol (Whitehead *et al.*, 1984; Mc Dowell *et al.*, 2002).

Se han encontrado relaciones empíricas entre el área o la biomasa foliar del dosel y los tallos que

la sustentan, para distintas especies arbóreas y arbustivas, coníferas y latifoliadas, pero aún no se han determinado para las especies de *Prosopis*.

Los árboles del género *Prosopis* son uno de los principales componentes del bosque nativo del Chaco Árido y Semiárido argentino, que abarca más de 30 millones de hectáreas en el centro norte del país (Burkart, 1976). En los bosques de llanura del Chaco Árido, las especies arbóreas predominantes son *Prosopis flexuosa* D.C. (algarrobo negro) y *Aspidosperma quebracho-blanco* Schlecht (quebracho blanco) (Carranza y Ledesma, 2005). Por la calidad de la madera, por el valor nutricional de sus frutos y por su abundante floración de alta calidad para la apicultura, el algarrobo negro reviste una enorme importancia en las economías regionales de su amplia zona de distribución. A través de su asociación con bacterias del género *Rhizobium* aporta nitrógeno atmosférico al sistema suelo-vegetación, y su amplio sistema radicular es de fundamental importancia en el ciclado de agua y nutrientes (Abril *et al.*, 1993; Carranza y Ledesma, 2005; Carranza, 2009). Todas estas características, sumadas a que su copa intercepta relativamente poca radiación fotosintéticamente activa, hacen que *P. flexuosa* sea una especie particularmente valiosa para integrar sistemas silvopastoriles.

El presente trabajo tuvo por objetivo ajustar modelos alométricos basados en distintas variables dendrométricas, que permitan estimar la biomasa foliar de *P. flexuosa* con simplicidad operativa y precisión.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio es un sector de bosque nativo del departamento San Alberto, próximo al paraje San Martín (31°52" S; 65° 30" O; 380 msnm) en el oeste de la provincia de Córdoba, Argentina. Los suelos son someros, con baja retención de humedad y textura franco arenosa. El clima es subtropical seco, con 500 mm de precipitación anual,

de ocurrencia estival y evapotranspiración anual superior a los 1000 mm (Capitanelli, 1979).

Se seleccionaron seis árboles adultos, dominantes y sanos de *P. flexuosa* durante el mes de diciembre, momento en que el follaje de los algarrobos había alcanzado su pleno desarrollo (Parižek *et al.*, 2000).

Para caracterizar los árboles, se midieron el diámetro basal del tallo (DAB) con cinta dendrométrica (precisión 1 mm), la longitud del fuste con cinta métrica (precisión 10 cm), la altura total con clinómetro (precisión 10 cm) y se determinaron la edad y el número de anillos de crecimiento de la albura (Tabla 1).

La selección de los niveles de registro de las variables dendrométricas a utilizar en los modelos de regresión, se basó en la arquitectura de *P. flexuosa*, que al igual que *P. nigra*, posee un sistema de ramificación de tipo simpódico, con un meristema apical de vida limitada. Por ello el crecimiento en altura es discontinuo, a partir de la elongación del meristema apical, su aborto y la sustitución por meristemas laterales. En general, una yema domina y se vuelve erecta, continuando con la formación del tronco (Mogliá y Giménez, 2006). Esto es más evidente en árboles maduros, donde el tronco es el resultado de la superposición de los módulos de crecimiento. Según este modelo de ramificación, la posición jerárquica de un eje se corresponde a su número de orden: fuste, ramas primarias, ramas secundarias, ramas terciarias, etc. (Mogliá y Giménez, 2006). Sobre la base de este patrón se definió el registro de las variables dendrométricas a nivel del fuste y a nivel de las ramas, desde el primer al cuarto orden de ramificación.

Los árboles fueron abatidos y se extrajo una sección transversal de la base del fuste (a 30 cm del suelo evitando la base engrosada) y de su extremo distal (antes del inicio del engrosamiento de la primera ramificación). Posteriormente, en cada árbol se siguieron los distintos órdenes de ramificación, para extraer una sección transversal de

Tabla 1: Principales características estructurales de los árboles de *Prosopis flexuosa*

Árbol	diámetro basal tallo (cm)	largo fuste (m)	altura total (m)	edad (años)	anillos albura basal (n°)
1	21,3	1	6	45	7
2	13,9	1,2	6,4	32	5
3	25,4	0,6	7,2	41	5
4	15,6	1,5	7,1	40	5
5	21,9	0,6	8,8	25	3
6	18,5	0,4	6	20	3
media	19,4	0,9	6,9	33	5
desvío estándar	3,9	0,4	1	9	1,3

leño en el extremo distal de cada rama (evitando el sector engrosado de cada bifurcación). El procedimiento continuó hasta que las ramas alcanzaron en su extremo distal un diámetro mínimo de 3 cm incluyendo la corteza, lo que ocurrió generalmente en el cuarto orden de ramificación. Para cada muestra de leño extraída se midió con cinta métrica (precisión 10 cm) la longitud del camino del agua (Zimmermann & Brown, 1971). Se entiende por camino del agua al largo total del trayecto de conducción de agua desde el suelo, siguiendo por tallo y ramas, hasta llegar a cada sección transversal seleccionada. Finalmente, se recolectaron cuidadosamente todas las hojas correspondientes a cada nivel de ramificación.

Dado que no se disponía de antecedentes sobre la permeabilidad hidráulica de los anillos de albura de diferente edad en *Prosopis*, se realizó una prueba de tinción de los vasos conductivos del xilema (Kozlowsky & Winget, 1963; Zimmerman & Brown, 1971). Para ese fin, previo al apeo, en tres árboles se inyectó safranina diluida al 0,5 % a través de un orificio de 5 cm de profundidad, espesor en el cual se esperaba incluir los anillos de la albura y los últimos anillos del duramen. El orificio fue practicado en un lado del tallo y en una posición intermedia a su longitud. La perfusión duró 72 h a una presión de 0,1 bar. Finalmente se extrajo una rodaja a 10 cm por encima del sitio de tinción, adonde la safranina debió ascender con el flujo de savia a través de los vasos con función conductiva.

Determinaciones en laboratorio:

Las hojas recolectadas se secaron a 70 °C hasta peso constante y se pesaron (precisión de 0,1 gr). Mediante la acumulación de los valores de peso de hojas, se obtuvo la biomasa foliar distal a cada sección transversal de tallo extraída. Así, la biomasa foliar de una rama primaria resulta de la suma de la biomasa foliar de sus ramas secundarias, y la biomasa foliar de éstas, de la suma de la de sus ramas terciarias. La biomasa foliar correspondiente a las secciones transversales basal y distal del fuste fue la biomasa foliar acumulada de todo el árbol.

Para el estudio dendrométrico, las secciones transversales de leño se secaron al aire y se pulieron con lijadora orbital (Carranza *et al.*, 2000). En *P. flexuosa* existe una clara diferenciación por color entre albura y duramen y los anillos de crecimiento son visibles dada la diferencia entre el arreglo general del leño temprano y el leño tardío (Villalba, 1985). En cada sección transversal y con la ayuda de una lupa binocular, se midió con calibre digital (precisión 1 mm) el diámetro sin corteza y el espe-

sor de la albura, siguiendo dos ejes ortogonales y promediando los datos obtenidos en un único valor. La superficie del área de albura se calculó asumiendo un perfil circular (Bond-Lamberty *et al.*, 2002). Para determinar la edad de los árboles se hizo recuento del número de anillos de crecimiento en la rodaja basal del fuste de cada árbol, con la ayuda de una lupa binocular estereoscópica, diferenciando los anillos correspondientes a la albura y al duramen. También se observó la localización de los vasos teñidos con safranina en la muestra obtenida para tal fin.

Análisis estadístico:

Dado que los modelos lineales subestimaron la producción de biomasa foliar en las ramas de menores dimensiones, se analizaron relaciones potenciales, de la forma $Y = a X^b$, donde Y es biomasa de hojas y X es la variable independiente relacionada a la función conductiva del tallo (diámetro o área de albura). Este tipo de función es ampliamente utilizada para establecer relaciones alométricas (Lott *et al.*, 2000; Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Bond *et al.*, 2002). Mediante la transformación logarítmica de las variables, se llevó el modelo a la forma lineal: $(\ln Y) = a + b (\ln X)$, para facilitar la interpretación de las relaciones curvilíneas (Whittaker & Marks, 1975, citado por Lott *et al.*, 2000). A fin de intentar mejorar la predicción, se calcularon modelos de regresión lineal múltiple, agregando como variables predictoras a la longitud del camino del agua, en el caso de determinaciones a nivel de ramas, y a la altura del árbol, en el caso de determinaciones a nivel de fuste.

Los modelos de regresión simple y múltiple fueron establecidos en cada uno de los siguientes niveles: extremo basal del fuste; extremo apical del fuste; extremo distal de las ramas primarias (considerado como base de la copa viva del árbol) y extremo distal de las ramas secundarias, terciarias y cuaternarias agrupadas, nivel que recibe la denominación "dentro de la copa" viva del árbol (Tabla 2).

Los modelos se calcularon con intercepto, ya que su eliminación hace que el coeficiente de determinación aumente y se sobreestime de esta forma la bondad del ajuste de los modelos (Arnold & Good, 1981). Los autores asumen que los modelos deben utilizarse dentro de los intervalos de magnitud de las variables predictoras con que se calcularon y que a variables predictoras nulas, corresponde biomasa foliar cero.

En síntesis, las relaciones funcionales analizadas a nivel de base de la copa y dentro de la copa,

Tabla 2: Medidas resumen de las variables utilizadas en las ecuaciones alométricas en cuatro niveles: dentro de la copa; extremo distal de las ramas primarias, extremo distal del fuste y base del fuste de los árboles de *Prosopis flexuosa*.

nivel	variables	rango	media
dentro copa (n = 69)	diámetro rama (mm)	13,5 - 146,5	71,8
	área de albura rama (cm ²)	1,4 - 52,5	18,2
	biomasa foliar (gr)	38,8 - 4873,7	1515
	camino del agua (m)	1,4 - 4,5	2,9
extremo distal ramas primarias (n = 12)	diámetro ramas primarias (mm)	27,5 - 171,5	115
	área de albura ramas primarias (cm ²)	3,9 - 69,5	40,8
	biomasa foliar (gr)	119 - 7862,8	3803
	camino del agua (m)	1,4 - 3,2	1,8
extremo distal fuste (n=6)	diámetro distal fuste (mm)	130 - 240,5	187,7
	área de albura distal fuste (cm ²)	39,1 - 134,6	88,8
	biomasa foliar (gr)	3577 - 15263	8455,4
	altura árbol (m)	6 - 8,8	6,9
base fuste (n=6)	diámetro basal fuste (mm)	135 - 243,5	193,7
	área de albura basal fuste (cm ²)	54,4 - 135,1	94,81
	biomasa foliar (gr)	3577 - 15263	8455,4
	altura árbol (m)	6 - 8,8	6,9

fueron:

- Ln biomasa foliar = f (Ln diámetro; longitud camino del agua; (Ln diámetro) x longitud camino del agua)

- Ln biomasa foliar = f (Ln área albura; longitud camino del agua; (Ln área albura) x longitud camino del agua)

Las relaciones a nivel de base y extremo distal del fuste fueron:

- Ln biomasa foliar = f (Ln diámetro; altura del árbol; (Ln diámetro) x altura del árbol)

- Ln biomasa foliar = f (Ln área albura; altura del árbol; (Ln área albura) x altura del árbol)

Para el ajuste de los modelos y el análisis estadístico se utilizó el programa InfoStat versión 2008. Mediante análisis de regresión por el método de los mínimos cuadrados, se obtuvieron los estimadores de los parámetros de los modelos. El nivel de significación seleccionado para las pruebas de hipótesis de efectos nulos fue $\alpha = 0,05$. La bondad de ajuste de los modelos fue comparada a través del coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) y del error relativo, calculado mediante la raíz cuadrada del error cuadrático medio de la predicción (ECMP), dividido por la media de la variable de respuesta. mediante estimación de máxima verosimilitud PROC MIXED SAS (versión 8.1) (Littell *et al.*, 2006) se contempló la posible correlación entre observaciones provenientes de un mismo árbol, a través de la estimación del componente de varianza asociado al efecto aleatorio "árbol". Con el mismo procedimiento se evaluó la posible correlación entre observaciones provenientes de un mismo orden de ramificación.

RESULTADOS

Los árboles de *P. flexuosa* tenían una edad media de 35 años, un diámetro de tallo de 20 cm y una altura total promedio de 6,9 m. El 80% del área transversal basal del fuste correspondía al duramen. En tanto, el 20% del área transversal remanente, correspondiente a la albura, abarcaba los últimos cinco anillos de crecimiento anual (Tabla 1). En los árboles sometidos a tinción se observaron vasos coloreados en todos los anillos de la albura, pero ninguno en el duramen. Si bien no fue evaluada la variación axial de la permeabilidad de la albura, a los fines de este trabajo se asumió que la totalidad del área de albura cumple similar función conductiva.

El efecto aleatorio "árbol" no fue estadísticamente significativo (datos no mostrados) en ninguno de los modelos alométricos. Tampoco fue estadísticamente significativo el efecto aleatorio "orden de ramificación" entre las ramas secundarias, terciarias y cuaternarias (datos no mostrados), por lo cual los datos de estos tres niveles fueron agrupados.

En ninguno de los modelos ajustados fueron significativos la longitud del camino del agua ni la interacción de éste con albura o diámetro de las ramas. Tampoco fue significativa la variable altura del árbol en los modelos que utilizaron diámetro o albura del fuste.

En todos los niveles, para la estimación de la biomasa foliar, el mejor ajuste se obtuvo con el modelo que utilizó como variable predictora al área de albura (Tabla 3).

Las estimaciones que utilizaron variables independientes a nivel de las ramas primarias y a nivel

dentro de la copa, tuvieron similar error relativo que las que se ajustaron utilizando variables del fuste, pero las superaron ampliamente en cuanto al coeficiente de determinación (Tabla 3; Figuras 1, 2, 3 y 4).

DISCUSIÓN

En este trabajo se encontraron relaciones funcionales bien definidas, positivas y significativas entre variables dendrométricas relacionadas al área conductiva y la biomasa de hojas de plantas adultas de *P. flexuosa*.

Por no resultar significativa la variable auxiliar "árbol", se puede asumir que los modelos son de aplicación general para la población de plantas adultas de *P. flexuosa* del área de estudio y en el rango de variación de las dimensiones de los árboles muestreados.

Las estimaciones de biomasa foliar que presentaron mejor ajuste fueron aquellas basadas en variables dendrométricas medidas dentro de la copa viva y en la base de la copa viva, superando a las estimaciones efectuadas con variables medidas en el fuste.

Los modelos basados en variables medidas dentro de la copa viva, utilizaron un número de pares de valores varias veces mayor que en el resto de los niveles. Nygren *et al.* (1993) y Lott *et al.* (2000) encontraron muy poca diferencia entre los modelos calculados en ambos niveles de la copa (habiendo utilizado también un número de pares de valores muy desigual) y concluyeron que la precisión de la estimación y la facilidad que aporta la medición del diámetro en la base de la copa, no justificaría el mayor trabajo que significa la medición del diámetro de ramas de ordenes de ramificación mayor.

Las peores estimaciones de biomasa foliar fueron las obtenidas en la base del fuste, seguidas de las medidas en el ápice del fuste. Así, si bien

existen antecedentes de estimación adecuada de la biomasa foliar de árboles pequeños y arbustos a partir de variables dendrométricas medidas en la base del fuste (Snell y Brown, 1978; Ganskopp & Miller, 1986), esto no ocurrió en este caso, en el que se obtuvo el peor coeficiente de determinación y que no se mejoró con el agregado de la variable altura del árbol. Algo similar se había encontrado en coníferas, en las que las peores relaciones entre biomasa foliar y variables dendrométricas fueron las determinadas a 1,3 m del suelo, respecto de las medidas dentro de la copa y en la base de la copa (Waring, 1983; Margolis *et al.*, 1988; Mencuccini & Grace, 1994). Esto es atribuible a una débil respuesta del crecimiento de las porciones basales del árbol, respecto de los dinámicos cambios que pueden ocurrir en hojas y ramas.

En general, la albura resultó ser mejor variable predictora que el diámetro y explicó mayor proporción de la variabilidad de la biomasa de hojas, con menor error. El menor valor predictivo del diámetro radica en que éste incluye junto con las áreas conductivas de la albura, los tejidos de sostén mecánico y los sitios de almacenaje (Lott *et al.*, 2000; Meadows & Hodges, 2002). Así, mientras el diámetro guarda la historia de vida del leño, la albura en el caso de *P. flexuosa* sólo guarda, en promedio, el registro de los últimos cinco años.

En la estimación de la biomasa foliar de latifoliadas y coníferas, el área transversal de las ramas había resultado una buena variable predictora (Nygren *et al.*, 1993; Mencuccini & Grace, 1994; Lott *et al.*, 2000), pero no se la había comparado con el área de albura. Meadows & Hodges (2002) señalaron que el agregado de variables independientes (como edad, largo de copa, altura total) en modelos de regresión múltiple cuyo predictor fue el diámetro, mejoraron la determinación y redujeron el error de la estimación de la biomasa foliar, pero tuvieron poco efecto cuando el predictor fue el área de albura. En este trabajo, el agregado de

Tabla 3: Ecuaciones de regresión lineal para la estimación de la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* en cuatro niveles: dentro de la copa; extremo distal de las ramas primarias; extremo distal del fuste y base del fuste. BF = biomasa foliar (gr); A = área de albura (cm²); D = diámetro (mm); R² = coeficiente de determinación ajustado; E = error relativo.

nivel	Y	X	P	Modelo	R ²	E
dentro copa (n = 69)	LnBF	Ln A	<0,0001	Ln BF = 3,58 + 1,26 Ln A	0,94	0,04
	LnBF	Ln D	<0,0001	Ln BF = -1,26 + 1,96 Ln D	0,91	0,05
ramas primarias (n = 12)	LnBF	Ln A	0,0001	Ln BF = 3,11 + 1,36 Ln A	0,98	0,03
	LnBF	Ln D	0,0001	Ln BF = -2,63 + 2,23 Ln D	0,98	0,04
extremo distal fuste (n=6)	LnBF	Ln A	0,0099	Ln BF = 4,39 + 1,03 Ln A	0,80	0,04
	LnBF	Ln D	0,0114	Ln BF = -2,06 + 2,09 Ln D	0,79	0,04
base fuste (n=6)	LnBF	Ln A	0,018	Ln BF = 2,28 + 1,47 Ln A	0,73	0,04
	LnBF	Ln D	0,08	Ln BF = -3,26 + 2,32 Ln D	0,62	0,05

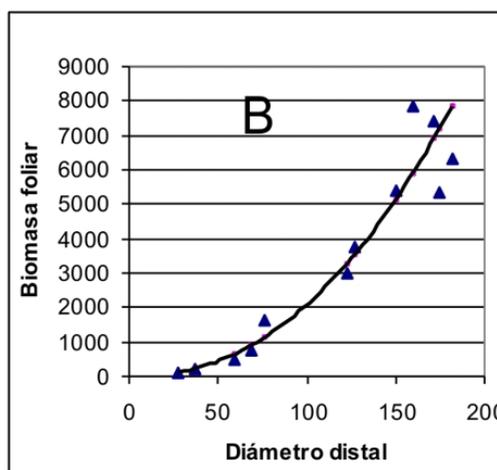
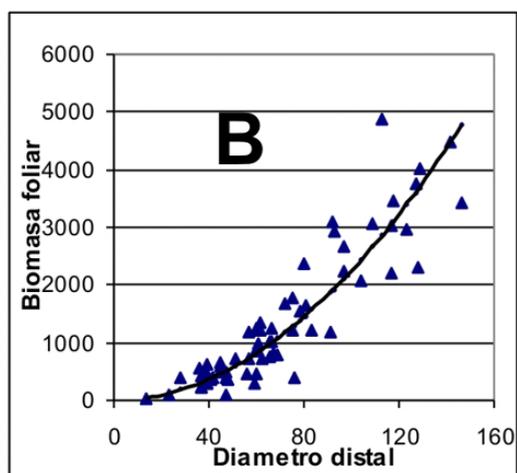
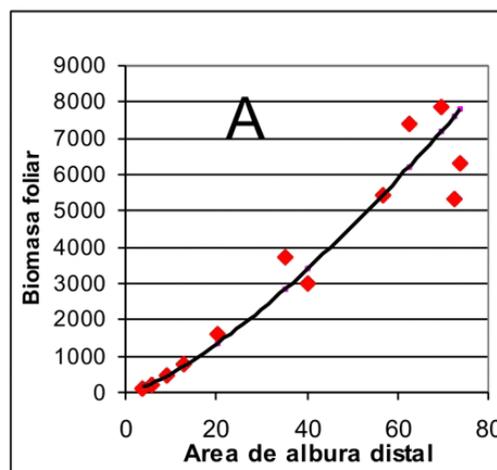
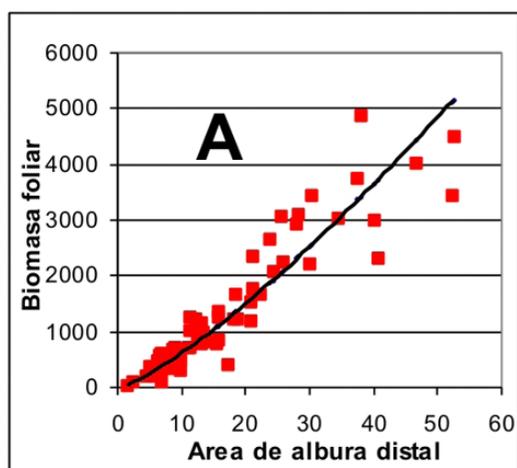


Figura 1: Funciones alométricas dentro de la copa (ramas de orden secundario, terciario y cuaternario agrupadas). Dispersión de los datos y líneas de tendencia de los valores observados, transformados a partir del modelo logarítmico: (A): $\text{Ln biomasa foliar (gr)} = f(\text{Ln del área de alburas distal en cm}^2)$ y (B): $\text{Ln biomasa foliar (gr)} = f(\text{Ln del diámetro distal en mm})$

Figura 2: Funciones alométricas a nivel de ramas primarias. Dispersión de los datos y líneas de tendencia de los valores observados, transformados a partir del modelo logarítmico: (A) $\text{Ln biomasa foliar (gr)} = f(\text{Ln del área de alburas distal en cm}^2)$ y (B) $\text{Ln biomasa foliar (gr)} = f(\text{Ln del diámetro distal en mm})$

la variable "longitud del camino del agua" no fue significativo, quizá por el rango de tamaños analizados.

La mayor diferencia en el valor predictivo de la alburas respecto al diámetro para estimar la biomasa foliar, se observa en la base del fuste. Esta pérdida del valor explicativo del diámetro, puede atribuirse a que en la base de la copa de *P. flexuosa* es común la presencia de ramas secas de relativo grosor, conocidas localmente como "leña campana", cuya muerte se debe a los bajos niveles de radiación registrados en esa posición. Esa pérdida de follaje se puede relacionar con una reducción proporcional de la alburas más antigua, que se con-

vierte en duramen (Sievänen *et al.*, 1997), pero sin generar variaciones en el diámetro. A medida que se avanza en el orden de ramificación, la proporción de duramen disminuye, lo que hace que en los órdenes superiores, el diámetro refleje mejor la "historia reciente" de la rama, y pueda explicar mejor la biomasa de hojas.

En síntesis, es factible la estimación de la biomasa de hojas de árboles de *P. flexuosa* utilizando regresiones alométricas del tipo $Y = aX^b$. El área de alburas resulta ser la mejor variable predictora, tanto dentro de la copa viva como a nivel de las ramas primarias, pero su determinación es difícil porque implica la toma destructiva de una

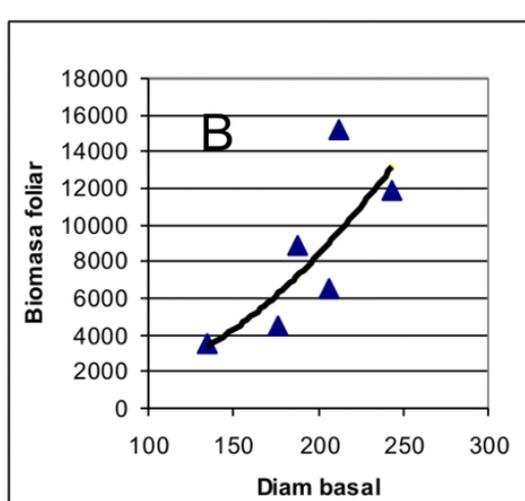
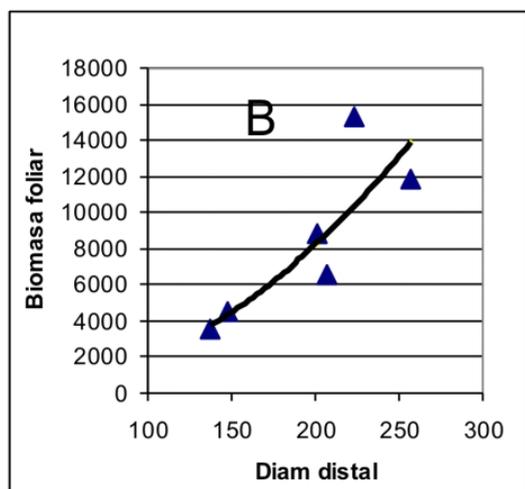
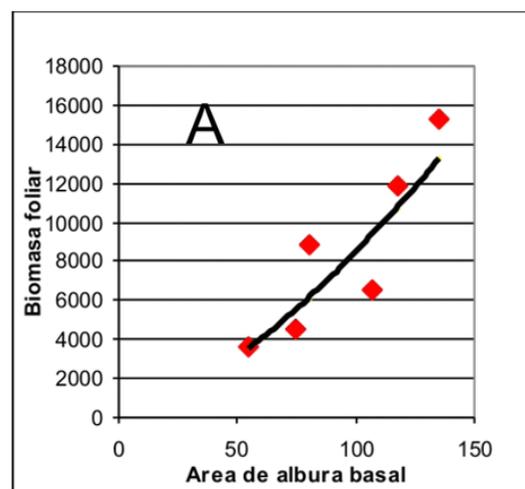
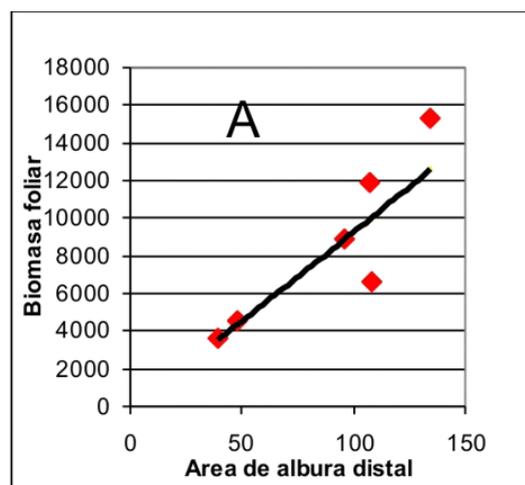


Figura 3: Funciones alométricas a nivel del extremo distal del fuste. Dispersión de los datos y líneas de tendencia de los valores observados, transformados a partir del modelo logarítmico: (A) $\text{Ln biomasa foliar (gr)} = f(\text{Ln del área de albura en cm}^2)$ y (B) $\text{Ln biomasa foliar (gr)} = f(\text{Ln del diámetro en mm})$

Figura 4: Funciones alométricas a nivel de la base del fuste. Dispersión de los datos y líneas de tendencia de los valores observados, transformados a partir del modelo logarítmico: (A) $\text{Ln biomasa foliar (gr)} = f(\text{Ln del área de albura en cm}^2)$ y (B) $\text{Ln biomasa foliar (gr)} = f(\text{Ln del diámetro en mm})$

sección transversal de las ramas o, al menos, de muestras de barreno de pocos centímetros de espesor. Alternativamente, es factible utilizar el modelo predictivo basado en el diámetro distal de las ramas primarias como método no destructivo y de muy buena precisión para la estimación de la biomasa foliar.

Para la generación de modelos de aplicación más general, se requerirá ampliar el rango de tamaños de los árboles e incluir rodales ubicados en diferentes sitios.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue financiado a través del Proyecto Nacional INTA PNFOR 520401 "Sistemas Silvopastoriles en la República Argentina: aspectos básicos del funcionamiento de los sistemas para el desarrollo de tecnologías de instalación y manejo". Los trabajos de campo y gabinete, se realizaron con la valiosa ayuda de Ana Córdoba, Diego López Lawestein, Juan Argüello, Eva Pereyra y María Olmedo.

BIBLIOGRAFIA

- Abril, A.; M. Acosta; O. Bachmeier y A. Rollán, 1993. Efecto de la cobertura vegetal sobre la actividad biológica de un suelo del Chaco Árido. *Revista Argentina de Microbiología*. 25: 15-26.
- Acosta-Mireles, M.; J. Vargas-Hernández; A. Velázquez-Martínez y J. Etchevers-Barra, 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, Méjico. *Agrociencia* 36:725-736.
- Arnold, J. C. and I.J. Good, 1981. How to get a large r^2 without really trying. *J. Stat. Comput. Simul.* 14: 69-71
- Bond-Lamberty, B.; C. Wang and S.T. Gower, 2002. Aboveground and belowground biomass and sapwood area allometric equations for six boreal tree species of northern Manitoba. *Can. J. For. Res.* 32:1441-1450
- Burkart, A., 1976. A Monograph of the Genus *Prosopis* (Leguminosae, Subfam. Mimosoideae). *J. Arnold Arb.* 57(4).
- Capitanelli, R., 1979. Clima. En *Geografía Física de la provincia de Córdoba*. Eds. Vázquez, J; R Miatello & M Roqué. Ed. Boldt., Buenos Aires, 45-138
- Carranza, C.A., 2009. Sistemas Silvopastoriles en Bosque Nativo del Chaco Argentino. En *Actas Primer Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles*. 14 al 16 de Mayo de 2009, Posadas. Pp 48-58.
- Carranza, C.A.; L. Pietrarelli; M. Ledesma y M. Balzarini, 2000. Crecimiento de *Prosopis flexuosa* D.C. en el Chaco Arido Argentino, luego de la eliminación del estrato arbustivo. *Multequina* 9:119-133.
- Carranza, C. A. y M. Ledesma, 2005. Sistemas Silvopastoriles en el Chaco Árido. IDIA XXI. Forestales. Ed. INTA. Año V N° 8: 240-246.
- Cruziat, P.; H. Cochard and T. Ameglio, 2002. Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Ann. For. Sci.* 59:723-759
- Ganskopp, D. and R. Miller, 1986. Estimating leaf area of big Sagebrush from measurement of sapwood. *Journal of range management* 39 (4):338-340
- InfoStat 2008. InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, Facultad Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Kozlowski T. T. and CH. Winget, 1963. Patterns of water movement in forest tress. *Botanical Gazette* 124: 301-311
- Lambers, H.; F. Stuart Chapin III and T.I. Pons, 1998. *Plant Physiological Ecology*. Ed. Springer. Pp.179-181
- Littell, R.; G. Milliken; W. Stroup; R. Wolfinger and O. Schabenberger, 2006. SAS for Mixed Models. Second Edition. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Lott, J.E.; S.B. Howard; C.R. Black and C.K. Ong, 2000. Allometric estimation of above ground biomass and leaf area in managed *Grevillea robusta* agroforestry systems. *Agroforestry systems* 49:1-15
- Margolis, H.A.; R.R. Gagnon; D. Pothier and M. Pineau, 1988. The adjustment of growth, sapwood area, heartwood area and saturated sapwood permeability of balsam fir after different intensities of pruning. *Can. J. For. Res.* 18:723-727
- Mc Dowell, N.; H. Barnard; B.J. Bond; T. Hincley; R. M. Hubbard; H. Ishii; B. Kostner; F. Magnani; J. D. Marshall; F.C. Meinzer; N. Phillips; M. G. Ryan and D. Whitehead, 2002. The relationship between tree height and leaf area: sapwood area RATIO. *Oecologia* 132:12-20.
- Meadows, J.S. and J.D. Hodges, 2002. Sapwood area as an estimator of leaf and foliar weight in cherry bark oak and green ash. *Forest Science* 48(1):69-76
- Mencuccini, M. and J. Grace, 1994. Climate influences the leaf area/sapwood area ratio in Scots pine. *Tree Physiology* 15:1-10
- Moglia, G. y A.M. Giménez, 2006. Resultados preliminares de la Arquitectura Vegetal de *Prosopis alba* y *Prosopis nigra*. En: Segundas Jornadas Forestales de Santiago del Estero: Forestación y Aprovechamiento Integral del Algarrobo. Santiago del Estero, 16 / 6 / 2006. (Disponible en <http://fcf.unse.edu.ar/eventos/2-jornadas-forestales/pdfs>. Consultado el 04/05/2010).
- Norman, J. M. and G.S. Campbell, 1991. Canopy structure. In *Plant Physiological Ecology*. Ed. Pearcy RW; JR Ehleringer; HA Mooney & PW Rundel. Chapman and Hall.
- Nygren, P.; S. Rebottaro and R. Chavarria, 1993. Application of the pipe model theory to non destructive estimation of leaf biomass and leaf area of pruned agroforestry tress. *Agrofor. Sys.* 23:63-77
- Ojansuu R. and M. Maltamo, 1995. Sapwood and heartwood taper in Scot pine stems. *Can. J. For. Res.* 25(12): 1928-1943.
- Parizek, B.; M. de la Reta; L. Catalán, M. Balzarini y U. Karlin, 2000. Observaciones fenológicas del algarrobo negro (*Prosopis flexuosa* D.C.) y del algarrobo blanco (*Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz) en el Chaco Árido, Argentina. *Multequina* 9:135-146.
- Pereira, J.C.M.; M. Tomé; J.M.B. Carreiras; J.A. Tomé; J.S. Pereira; J.S. David and A. Fabiao, 1997. Leaf area estimation from tree allometrics in *Eucalyptus globulus* plantations. *Can. J. For. Res.* 27:166-173.
- Shelburne, V.B.; R.L. Hedden and R.M. Allen, 1993. The effects of site, stand density, and sapwood permeability on the relationship between leaf area and sapwood area in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *For. Ecol. Manage.* 58:193-209.
- Snell, J.A.K. and J.K. Brown, 1978. Comparison of tree

- biomass estimators: DBH and sapwood area. *For. Sci.* 24: 455-457.
- Shinozaki, K.; K. Yoda; K. Hozumi and T. Kira, 1964. A quantitative analysis of plant form- the pipe model theory. I. Basic analyses. *Jpn. J. Ecol.* 14:97-105.
- Sievänen, R.; E. Nikinmaa and J. Perttunen, 1997. Evaluation of importance of sapwood senescence on tree growth using the model lignum. *Silva Fennica* 31(3):329-340.
- Turner, D.P.; S.A. Acker; J.E. Means and S. L. Garman, 2000. Assessing alternative allometric algorithms for estimating leaf area of Douglas-fire trees and stands. *For. Ecol. Manage* 126: 61-76.
- Villalba, R, 1985. Xylem structure and cambial activity in *Prosopis flexuosa* D.C. *IAWA Bulletin* 6(2).
- Waring, R.H., 1983. Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Advances in Ecological Research* 13:327-354.
- Waring, R.H.; P.E. Schroeder and P. Oren, 1982. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Can. J. For. Res.* 12:556-560.
- Whitehead, D.; W.R.N. Edwards and P.G. Jarvis, 1984. Conducting sapwood area, foliage area and permeability in mature trees of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. *Can. J. For. Res.* 14:940-947.
- Zimmermann, M.H, 1983. Xylem structure and the ascent of sap. Springer-Verlag. Berlin.
- Zimmermann, M.H. and C.L. Brown, 1971. Trees structure and function. Springer-Verlag. Nueva York.