

Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill

Estimation of aerial biomass in Eucalyptus viminalis Labill trees and stands

Ferrere, P.¹; A. M. Lupi² y R. T. Boca³

Recibido en febrero de 2014; aceptado en octubre de 2014

RESUMEN

Los modelos de biomasa resultan herramientas de aplicación directa para su estimación en diferentes compartimentos y aplicables a estudios ambientales de fijación de CO₂, a la determinación de la biomasa maderable y de la biomasa para bioenergía. En el presente trabajo se relevaron y muestrearon 12 plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill localizadas en el centro-oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Se ajustaron y seleccionaron modelos para estimar la biomasa aérea (en hojas, ramas y fuste) de árboles individuales y de rodal. Se ajustaron modelos lineales de árbol individual para la estimación de fracciones de biomasa y el que mostró mejor ajuste consideró la transformación logarítmica del diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total (h). En cuanto a la altura media del rodal, el modelo más apropiado fue el que considera el dap y la edad. Para estimar la biomasa aérea a nivel de rodal se utilizaron ecuaciones no lineales, siendo el modelo de Gompertz el que mejor respuesta presentó, recomendando su aplicación.

Palabras claves: Ecuaciones alométricas; Volumen; *Eucalyptus viminalis*; Modelos lineales y no lineales.

ABSTRACT

Adjusted models are direct-application tools to estimate biomass in different compartments applicable to environmental studies of CO₂ fixation, determination of lumber biomass and bio-energy biomass. Twelve plantations of *Eucalyptus viminalis* Labill were identified and sampled in the Central West area of the province of Buenos Aires, Argentina. Models were adjusted and selected to estimate aerial biomass (leaves, branches and shafts) of individual trees and stands. Linear models of individual-tree were adjusted to estimate components of biomass, and the log transformation of diameter at breast height (dbh) and total height (h) was considered as one of the best fit. As regards stands' mean height, the model with the best performance was the one considering dbh and age. In order to estimate aerial biomass at the stand level, non-linear equations were used. The model of Gompertz showed the best accuracy, so its use is suggested.

Key words: Allometric equations; Volume; *Eucalyptus viminalis*; Linear and non-linear models.

¹ Ing. Ftal. AER INTA 9 de julio. Mitre 857, (6500) 9 de Julio, Buenos Aires, Argentina. E-mail: pferrere@pergamino.inta.gov.ar (autor para correspondencia).

² Ing. Ftal. MSc. Instituto de Suelos. INTA Castelar. Las Cabañas y Los Reseros, (1712) Villa Udaondo Castelar, Buenos Aires, Argentina. E-mail: amlupi@cnia.inta.gov.ar

³ Ing. Agr. MSc. Instituto de Clima y Agua. INTA Castelar. Las Cabañas y Los Reseros, (1712) Villa Udaondo Castelar, Buenos Aires, Argentina E-Mail: tboca@cnia.inta.gov.ar

1. INTRODUCCIÓN

En la ciencia forestal, la biomasa acumulada en un determinado momento del ciclo forestal y su producción en volumen, son empleadas como indicadores de la productividad del sitio. Estas estimaciones también son aplicadas en los estudios de ciclo de nutrientes, en el análisis de su eficiencia de uso en relación al manejo aplicado y en la evaluación de las funciones ambientales de los bosques. En estos últimos años, el aprovechamiento de la biomasa forestal como fuente de generación de energía es un punto que ha tomado importancia, requiriendo la estimación de la biomasa orientada a este objetivo específico (Guo *et al.*, 2006). A efectos de compatibilizar las funciones ambientales y productivas de los bosques y, para que ambos destinos sean eficientes y rentables en términos de producción física y económica, es necesario conocer el potencial de producción de un ambiente dado considerando las limitaciones del sitio en un esquema silvícola establecido (Muñoz Riveros *et al.*, 2005).

La estimación de la biomasa en un determinado componente del árbol requiere de un estudio destructivo (Brown *et al.*, 1989), para luego proceder al ajuste de funciones o modelos que predicen la biomasa del árbol en pie (Husch, 2001). Generalmente los modelos de estimación de biomasa se ajustan para cada especie, aunque se han generado modelos que integran varias especies, debido a la similitud en los patrones de crecimiento en determinados ambientes (Rodríguez Laguna *et al.*, 2007; Iglesias y Barchuk, 2010).

En el proceso de ajuste de los modelos existen expresiones matemáticas que contienen diversas variables independientes o combinaciones de éstas, que pueden explicar de manera más precisa la acumulación de biomasa y volumen del árbol. Para plantaciones de *Eucalyptus sp.* localizadas en el Congo, Laclau *et al.* (2000) desarrollaron funciones de biomasa para diferentes compartimentos del árbol. Los modelos presentados incluyen la edad y la circunferencia a la altura del pecho como variables independientes, en su forma lineal o cuadrática. Bajo condiciones ambientales similares, Saint-Andre *et al.* (2005) construyeron modelos de biomasa para híbridos de *Eucalyptus* donde incluyen el diámetro a la altura de pecho (dap) en su forma cuadrática (dap^2) y la altura medida del árbol (h) como variables independientes, y la edad como covariable. Vidal *et al.* (2003) y Montagu *et al.* (2005) trabajaron en el ajuste de funciones de biomasa en *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.* y encontraron que el dap resultó la variable más precisa para obtener ecuaciones a nivel regional. Sampaio y Silva (2005) modelaron ecuaciones de biomasa para nueve especies, construidas en forma agrupada e individual. Para las especies en conjunto los autores encontraron buenos coeficientes de determinación cuando emplearon el diámetro en la base del árbol en modelos exponenciales y cuadráticos. En contraposición a otros estudios, no observaron cambios importantes cuando la variable independiente fue el dap. Por otro lado, al considerar las especies en forma individual notaron que, si bien la altura estaba fuertemente correlacionada con la biomasa, el coeficiente de determinación fue inferior a los modelos con el dap. El trabajo desarrollado por Senelwa y Sims (1998), muestra que el mejor ajuste para la estimación de biomasa aérea se obtuvo con la expresión $\text{dap}^2 * h$ para distintas especies de *Eucalyptus sp.* e inclusive para *Pinus radiata* y *Acacia dealbata*. Antonio *et al.* (2007) trabajando con rodales de *E. globulus* de primera y segunda rotación detectaron un aumento de la capacidad predictiva de los modelos con la edad, que también incluyeron como variables independientes la altura dominante y la longitud de la copa. Asimismo, no encontraron efecto de la densidad del rodal, el índice de sitio y el clima en la alometría del árbol. Rodríguez Laguna *et al.* (2007) recomiendan una expresión exponencial del dap para la estimación de biomasa área en especies forestales de México.

Las estimaciones a nivel de rodal también requieren la construcción de modelos alométricos basados en variables que caracterizan el estado del mismo, tales como el diámetro medio, la altura dominante (H), la edad (E), el área basal (G) y la densidad del rodal (N). Para *Pinus pinaster* y *P. radiata*, Dieguez Aranda *et al.* (2009) utilizaron como variables independientes, el diámetro cuadrático, la H y la N. En general, para estas predicciones se plantean modelos no lineales dado que describen con mayor exactitud el crecimiento biológico de la masa. Estas

funciones resultan más precisas que los factores de expansión de biomasa (Soarez y Tomé, 2004; Soarez y Tomé, 2012), definidos como la relación entre la biomasa y el volumen del rodal. Para distintas especies forestales, Mendez González *et al.* (2011) recomiendan el uso del área basal en la estimación de fracciones de biomasa en plantaciones del género *Pinus*.

En la Argentina, los estudios de biomasa en plantaciones de rápido crecimiento son recientes y se concentran en la Mesopotamia (Goya *et al.*, 1997; Fassola *et al.*, 2010). En la región pampeana, entre las especies de rápido crecimiento que se cultivan se encuentra el *Eucalyptus viminalis* Lab. Su área de distribución se concentra en la zona centro-oeste de la provincia de Buenos Aires (Pampa arenosa), donde los suelos son naturalmente de baja fertilidad y tienen usos productivos acotados. A pesar de ser la especie más relevante a nivel regional no se cuenta con modelos ajustados para la especie, que puedan aplicarse para la estimación de la cantidad de biomasa que acumulan los individuos. Una primera aproximación fue realizada por Ferrere *et al.* (2008) y las ecuaciones de biomasa aérea incluyen el dap y la altura. Sin embargo, la cantidad de individuos se limitó a 21 árboles en un área reducida y no contenía mediciones temporales. Las limitaciones en disponibilidad de modelos a nivel de individuos lógicamente extiende la restricción al desarrollo de modelos a nivel de rodal.

Teniendo en cuenta que la biomasa aérea de los árboles representa el compartimento más importante de un monte y considerando la relevancia de una correcta evaluación de la materia seca dentro del ecosistema, se planteó como objetivo desarrollar modelos para estimar la biomasa aérea en los distintos compartimentos de individuos y rodales de *Eucalyptus viminalis* Lab.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Características del área de estudio

Los muestreos se realizaron en rodales de *Eucalyptus viminalis* Lab. establecidos en la región centro-oeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1); subregión conocida como pampa arenosa. Según Hurtado *et al.* (2005), los suelos de esta región, comparados con el resto de la región Pampeana, presentan escaso desarrollo, fueron formados a partir de la acción del viento que transportó sedimentos arenosos desde el oeste y fue depositándolos formando diferentes sectores dentro de la misma subregión. En este ambiente geográfico los rodales empleados para el estudio se ubicaron en suelos clasificados como *Hapludoles enticos* y *Udipsaments típicos* (INTA, 1990; Lupi *et al.*, 2013). Los primeros, localizados mayoritariamente en el norte de la región, son suelos más evolucionados, la vegetación natural es el pastizal que fue reemplazado por cultivos anuales. Hacia el sudoeste predominan los *Udipsaments*, llamados médanos continentales, son suelos menos evolucionados y aun presentan escasa cobertura natural. En muchos casos se ha sembrado “pasto llorón” (*Eragrostis curvula* Schrad) para su estabilización (Cairne, 1978).

El clima de región según Köppen-Grieger (Kottek *et al.*, 2006) resulta Cfa, es decir se trata de un clima templado húmedo sin estación seca, donde la temperatura media del mes más cálido es superior a 22 °C. Las precipitaciones medias anuales tienen un rango de 800 a 1000 mm desde el NE al extremo SO de la zona en estudio.

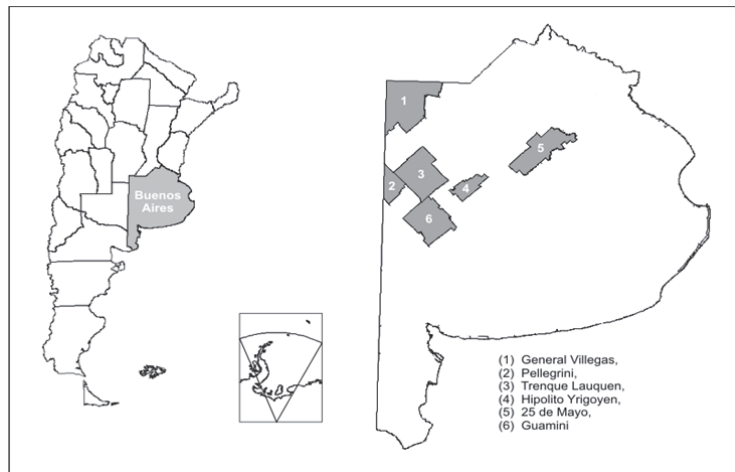


Figura 1. Área de estudio.

Mediciones dasométricas y muestreos

Las plantaciones seleccionadas constituyen una cronosecuencia que abarcaría una rotación forestal (Tabla 1) y se asume que éstas representan el estado de desarrollo característico de la misma a esa edad.

Tabla 1. Localización de los rodales, edad y cantidad de individuos cortados por sitio, para la determinación de biomasa de hojas, ramas y fuste.

Lugar	Sitio	Edad	Cantidad de individuos	Coordenadas geográficas
25 de mayo	25DM4*	4	7	35° 32' 59"S 60° 06' 19"O
Berutti	BE6	4	4	35° 51' 49" S 62° 29' 06"O
Pellegrini	PE4	4	3	36° 05' 40"S 63° 11' 12"O
Guamini	GUDI6§	6	6	36° 50' 15"S 62° 21' 04"O
Guamini	LM99	7	3	36° 47' 10"S 62° 24' 26"O
Guamini	GUDI8	8	1	36° 50' 27"S 62° 23' 30"O
Guamini	LM98	8	2	36° 45' 24"S 62° 24' 17"O
Villegas	VIVI8	8	1	35° 03' 30"S 62° 51' 45"O
Guamini	LM97L34	9	2	36° 47' 09"S 62° 19' 23"O
Guamini	GUDI10	10	4	36° 49' 56"S 62° 21' 42"O
Henderson	HE12 ^a	12	4	36° 15' 12"S 60° 50' 37"O
25 de mayo	25DM14	14	2	35° 31' 58"S 66° 05' 56"O

* Muestreo a los 4 (4 árboles) y 7 años (3 árboles); § muestreo a los 6 (5 árboles) y 9 años (1 árbol); muestreo a los 10 (3 árboles) y 13 años (1 árbol); ^a muestreo a los 10 y 12 años.

En cada rodal se establecieron, al azar, 6 parcelas circulares de 400 m²; este tamaño se considera apropiado dado que el número de individuos fue superior a 20. Sólo en los rodales de menor superficie se establecieron 2 o 3 parcelas (GUDI8, PE06 y 25DM14). En algunos sitios se repitieron las mediciones con una diferencia de 3 años, totalizando 108 parcelas. En todos los árboles en pie de cada una de las parcelas se midió la circunferencia a la altura del pecho (cap), luego transformada a dap (diámetro a la altura del pecho, cm). La altura total (h) se midió en 3 individuos, correspondientes al de mayor cap, al cap medio y al de menor cap. Las características que describen el estado de los rodales muestreados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de los rodales.

Sitio	Edad	N	D	H	G	HM
25DM4	4	944 ± 66	10,99 ± 0,87	11,25 ± 0,71	9,72 ± 1,52	9,64 ± 0,40
BE6	6	613 ± 92	13,06 ± 0,91	14,80 ± 0,38	9,16 ± 1,76	12,14 ± 0,59
GUDI8	6	883 ± 118	19,73 ± 0,81	18,91 ± 0,62	29,50 ± 5,82	15,27 ± 0,35
PE6	6	738 ± 53	10,84 ± 0,04	12,97 ± 0,07	7,20 ± 0,35	11,08 ± 0,08
LM99	7	913 ± 48	17,29 ± 1,40	18,09 ± 0,89	22,98 ± 4,51	15,08 ± 0,67
DI98	8	831 ± 85	22,99 ± 1,76	22,28 ± 0,66	36,61 ± 4,12	18,48 ± 0,80
LM98	8	825 ± 46	18,61 ± 1,13	20,37 ± 0,43	24,41 ± 1,67	16,42 ± 0,59
VIVI8	8	806 ± 80	20,41 ± 0,93	21,47 ± 0,44	29,58 ± 3,73	17,15 ± 0,46
LM97L34	9	944 ± 38	19,81 ± 0,66	22,82 ± 0,73	32,33 ± 3,47	18,20 ± 0,97
G10	10	817 ± 58	24,26 ± 0,43	23,98 ± 0,19	39,79 ± 2,99	20,68 ± 0,24
HE12	12	756 ± 182	21,33 ± 3,35	21,40 ± 1,31	28,39 ± 3,93	17,65 ± 1,49
25DM14	14	808 ± 151	23,96 ± 1,40	28,31 ± 1,06	39,79 ± 2,86	23,04 ± 0,71

N: densidad del rodal (pl.ha⁻¹), D: diámetro a la altura del pecho promedio (cm), H: altura dominante (m), G: área basal (m².ha⁻¹), HM: altura media (m).

Biomasa aérea de árbol individual

Se determinó la biomasa aérea de ramas y hojas de 39 individuos con dap comprendidos entre 9,2 cm y 32,5 cm y alturas entre 7,5 m y 28,4 m. Se tomó en cada sitio el árbol medio según la metodología reportada en Usuga *et al.* (2010). Cada individuo fue separado en los siguientes compartimentos: ramas (verdes y secas) (*br*) y hojas y frutos (*bh*). Las fracciones fueron pesadas a campo y submuestras de aproximadamente 300 g de cada individuo fueron secadas en estufa (65-70 °C) hasta peso constante para determinar materia seca (MS). Para la determinación de la biomasa del fuste hasta 5 cm de diámetro (*bf*) se utilizaron en total 50 individuos, tomando 10 árboles adicionales en los mismos sitios que los obtenidos para la determinación de hojas y ramas.

En las plantaciones de 4 años el fuste se pesó *in situ*. Para los individuos mayores a 4 años la determinación se realizó en forma indirecta; obteniendo el volumen mediante la cubicación, utilizando la ecuación de Smalian (Prodan *et al.*, 1997) y estos valores fueron afectados por el valor de densidad de la madera. Para determinar la densidad de la madera se extrajeron 29 muestras con barreno de Pressler en los sitios LM98 y LM99 a 1,30 m.

El modelo general ajustado para estimar la biomasa de cada compartimento fue: $y_i = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 h + \varepsilon_i$, donde y_i es la variable dependiente o biomasa, β_0 , β_1 y β_2 son los coeficientes del modelo a ajustar para las variables explicatorias, *dap* y *h* respectivamente, o alguna función de ellas que permita linealizar el modelo para cumplir con el supuesto de homocedasticidad (Myers, 1990). Para estimar los parámetros del modelo se utilizó el método de mínimos cuadrados (Weber y Skillings, 2000). En la selección de los distintos modelos ajustados se consideraron: el coeficiente de determinación R² ajustado, el error estándar, los errores relativos (ER) y error absolutos (EA) (Porté *et al.*, 2002). Se eligieron modelos lineales comúnmente empleados en la bibliografía (Barclay *et al.*, 1985; Spetch y West, 2003; Pilli *et al.*, 2006) que además reflejan el comportamiento de las variables evaluadas (Figura 2).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con R (Development Core Team R, 2013) usando los paquetes estadísticos *stats*.

Biomasa aérea a nivel de rodal

La biomasa a nivel de rodal se estimó a partir de modelos no lineales que emplean la altura dominante (H) como variable independiente. Se estimó la altura total de dichos individuos mediante una ecuación lineal de la forma: $\ln h = 0,46758 + 0,54164 * \ln \text{dap} + 0,365 * \ln \text{edad}$ ($R^2=0,81$, $\sqrt{CME} = 0,17$). El criterio adoptado para la estimación de la H fue el de 100 árboles. ha^{-1} más gruesos. Los valores de biomasa aérea de árbol individual estimados a partir del modelo seleccionado fueron expandidos a hectárea. Con los pares biomasa aérea - H se probaron los modelos de la Tabla 3; que mejor explican el proceso biológico de crecimiento y resultan de mayor aplicación en la bibliografía (Lundgren y Dolid, 1970; Deans *et al.*, 1996; García y Ruiz, 2003).

Tabla 3. Modelos no lineales entre altura dominante del *Eucalyptus viminalis* y la biomasa aérea.

Modelo	Expresión
Chapman - Richard	$y = \beta_0 * (1 - \exp(-\beta_1 * x))^{\beta_2}$
Exponencial negativa	$y = \beta_0 * (1 - \exp(-\beta_1 * x))$
Logística	$y = \frac{\beta_0}{\left(\exp\left(\frac{-(\log(x) - \beta_1)}{\beta_2} \right) \right)}$
Gompertz	$y = \beta_0 * \exp(-\beta_1 * \beta_2^{\log(x)})$

Donde y, es la biomasa aérea ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) y x, Edad o altura dominante

Se utilizaron los paquetes estadísticos *stats* y *nls* de R (R Development Core Team, 2013).

La estimación de los parámetros de los modelos no lineales se realizó a partir de funciones *self - starting* para los modelos Logística y Gompertz. Para los modelos Chapman-Richard y Exponencial negativa (o Monomolecular), los valores iniciales fueron obtenidos por aproximación gráfica. Para la selección del modelo se utilizaron los siguientes criterios: el AIC (criterio de Información de akaike); el log lik y el error estándar residual del modelo (Pinheiro y Bates, 2000). Se eligieron aquellos modelos que presentaron el valor de AIC más bajo. El log lik es un índice que analiza la función de distribución de los datos seleccionándose aquel modelo que tiene el valor mayor. El error estándar residual del modelo indica en cuanto se desvían los datos observados del modelo propuesto; se seleccionó aquel que presentó el menor error estándar. Otros indicadores para evaluar el ajuste de los modelos son la media de los valores absolutos de los residuos y el error relativo promedio o sesgo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa de hojas, ramas y fuste en el árbol

El grado de asociación entre las cantidades y la proporción de la biomasa de los diversos compartimentos en relación al dap , dap^2 , $\text{dap}^2 * h$ resultó significativo (Tabla 4). El coeficiente de correlación (r) más alto se encontró para el fuste y las ramas con el $\text{dap}^2 * h$ y el dap^2 respectivamente. En el caso de las hojas las correlaciones fueron inferiores, siendo mayor el grado de asociación con el dap^2 .

Tabla 4. Correlación entre la biomasa aérea en diferentes compartimentos y distintas variables dasométricas del árbol.

	Compartimiento	dap	dap ² *h (volumen)	dap ² (área basal)
cantidad (kg)	hojas	0,75*	0,68*	0,76 *
	ramas	0,87*	0,83*	0,89*
	fuste	0,94*	0,98*	0,96*
proporción (%)	hojas	-0,74*	-0,66*	-0,66*
	ramas	-0,06ns	-0,19*	-0,07ns
	fuste	0,65*	0,62*	0,58*

*: significativo al 1% ; ns: no significativo

Los coeficientes r disminuyeron notablemente al analizar las proporciones de biomasa, aunque fueron significativos en todos, a excepción de las ramas para el dap y dap². Los valores más altos se presentaron para las hojas, siendo la asociación negativa más importante con el dap, debido a que con el aumento en el tamaño del árbol con la edad se reduce la proporción de hojas en relación a la biomasa total aérea (Laclau *et al.*, 2000; Saint-André *et al.*, 2005). En contraposición, a medida que el árbol crece se produce una mayor acumulación de biomasa en el fuste, reflejado en las asociaciones positivas con las variables en estudio. En este caso, la variable que mejor explicó las variaciones en las proporciones de hojas y fuste fue el dap. Ninguna de las variables explicó satisfactoriamente la variación de la proporción de las ramas con el tamaño de los individuos (Tabla 4).

Las diferencias en biomasa de ramas y fuste observadas en las plantaciones de 7 y 9 años (Figura 2) estarían sugiriendo cambios en la estructura del rodal, a nivel de altura dominante y área basal, tal como se observa en la Tabla 2. Las ramas de la plantación de 7 años son mayores, probablemente por el menor área basal permitiendo un mayor desarrollo de la copa. En efecto, el área basal a los 7 años resultó un 28,9 % menor a la del año 9, en tanto que la altura dominante fue un 20,7 % tomando como referencia las mismas edades. En comparación con lo hallado por Montagu *et al.* (2005) en rodales de *E. pilularis* no se encontró una relación entre el tamaño de los árboles y los sitios muestreados; por lo tanto era esperable que las proporciones de biomasa no cambien con la calidad del lugar. Las proporciones de asignación de biomasa aérea de este estudio resultaron similares a las reportadas por Muñoz-Rivero *et al.* (2005) y Montagu *et al.* (2005).

Para analizar el comportamiento de las distintas fracciones de la biomasa aérea en relación a la variable dap²*h se graficaron las cantidades y proporciones de las mismas para las distintas edades (Figura 2). Todas las relaciones de cantidades de biomasa presentaron una tendencia lineal siendo más estrecha en el caso del fuste. Como se observa en la Figura 2 d, los árboles más jóvenes tuvieron una mayor proporción de hojas que decreció a medida que la edad aumentó. El máximo porcentaje de biomasa de hojas fue del 25,4 % a los 4 años en un árbol de 6,8 cm de diámetro y el mínimo fue de 4 % a los 10 años en un individuo de 25,4 cm. Los registros obtenidos en la plantación de 4 años parecerían diferenciarse de las restantes edades ya que se presentan más agrupados o con menor variabilidad; lo que puede atribuirse al estadio de desarrollo de la plantación, en que aún no manifiesta una competencia completa entre individuos o bien al dimorfismo foliar que se observa a edades tempranas, donde las hojas juveniles tienen mayor tamaño que las adultas.

Para el cálculo de la biomasa del fuste se determinó la densidad básica, cuyo valor promedio fue de 499 kg.m⁻³ ± 29 kg.m⁻³. Los valores extremos de densidad fueron de 567 kg.m⁻³ en un árbol de 20,5 cm de diámetro y de 433 kg.m⁻³ en un árbol de 26,7 cm. El valor de densidad básica promedio fue similar a los reportados para la misma especie por Repetti (1990) alcanzando los 505 kg.m⁻³. Otros autores reportan valores algo más altos como Schönau y Boden, (1981) en Sudáfrica, con 527 kg.m⁻³ y Silva *et al.*, (1984) citado por Gatto *et al.*, (2003)

de $570 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Los valores mencionados de otros estudios y los obtenidos en este trabajo difieren notablemente de los publicados por el Forest Service (1994), que reportan una densidad de $855 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. El fuste siempre representó más del 50% de la biomasa aérea. En las plantaciones jóvenes la proporción fue del 54% y alcanzó el 90% en las más adultas. El árbol muestreado con más biomasa en hojas y en ramas fue en el sitio GUDI10, con un peso de 38,3 kg y 38,6 kg respectivamente, correspondiente a un diámetro de 32,5 cm.

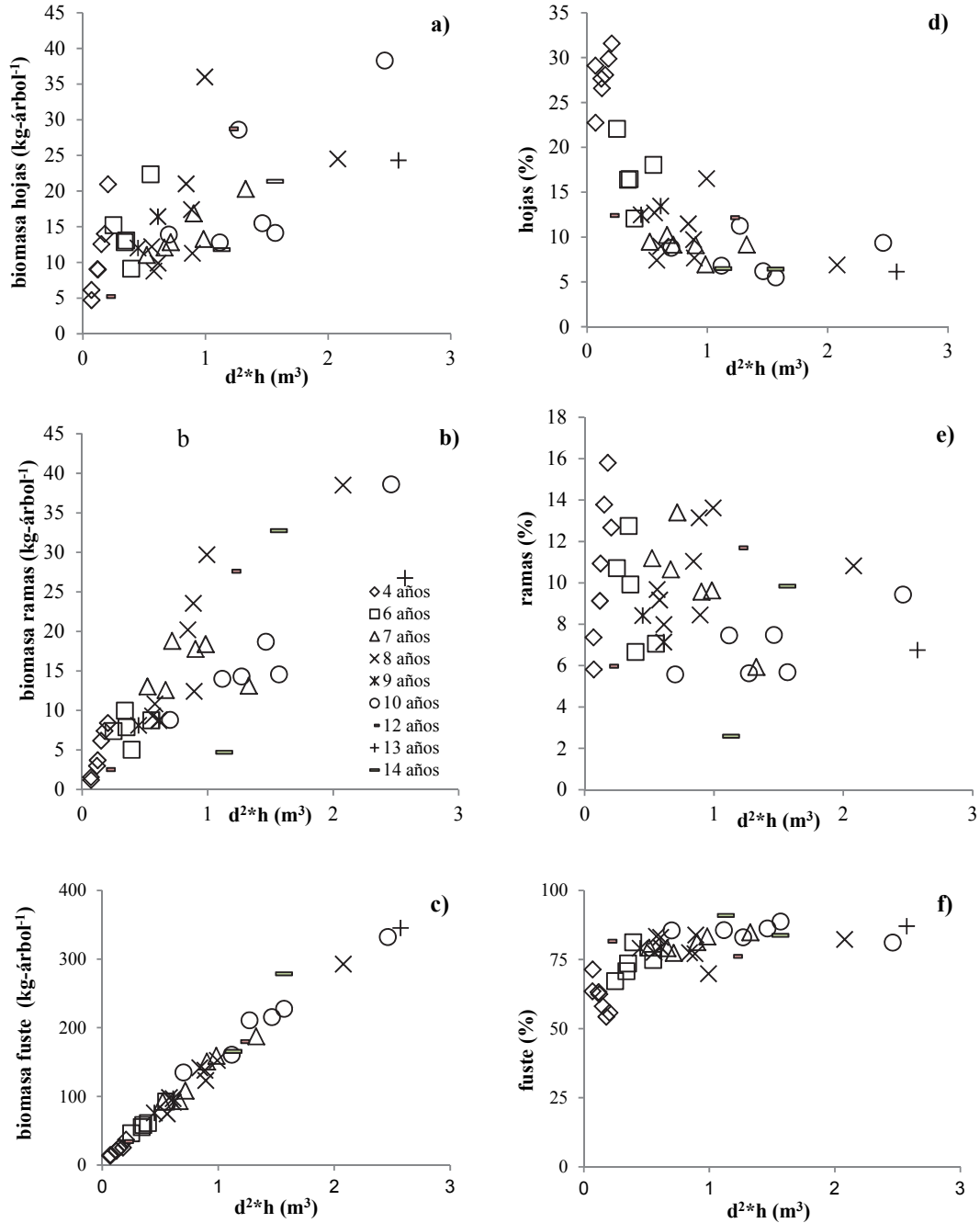


Figura 2. Relación entre el $d^2 \cdot h$ y a) biomasa de hojas, b) biomasa de ramas c) biomasa de fuste, d) porcentaje de hojas e) porcentaje de ramas y f) porcentaje de fuste.

Modelos de biomasa de hojas, ramas y fuste en árboles individuales

Se ajustaron distintos modelos lineales de biomasa en hojas, ramas y fuste según diferentes variables independientes (Tabla 5). Los mayores R^2 se encontraron en los modelos de biomasa de fuste, luego en los de ramas y finalmente, los menores se encontraron en los de biomasa en hojas, de acuerdo a lo encontrado por Navar *et al.* (2001). Para todas las fracciones se observó que la incorporación de la h mejoró la estimación en concordancia con lo mostrado por Snowdon *et al.* (2000). La expresión \ln - \ln redujo notablemente el \sqrt{CME} en todos los modelos por lo que fue la forma elegida de los modelos puestos a prueba. Estas expresiones también fueron las que mejor ajuste presentaron para la estimación de la biomasa aérea para Segura *et al.* (2006). En todos los compartimentos, el modelo exponencial linealizado con el dap y h mostró el más alto coeficiente de determinación y el menor \sqrt{CME} .

Tabla 5. Modelos para la estimación de la biomasa de hojas, ramas y fuste en plantaciones de *Eucaliptus viminalis*. En negrita están resaltados los mejores ajustes.

	Modelo	R^2_{aj}	\sqrt{CME}	ER(%)	EA (kg)
Hojas	1.- $bh=-3,70155+0,99865*dap$	0,52	5,42	-0,000	3,948
	2.- $bh=-2,99557+1,54169*dap-0,66087*h$	0,58	5,06	0,000	3,553
	3.- $bh=9,21774+00082*dap^2*h$	0,43	5,88	0,006	4,323
	4.- $bh=exp(-0,86135+1,19967*dap)$	0,58	5,46	0,724	3,810
	5.-$bh=exp(-1,05404+1,9618*\ln dap-0,73364*\ln h)$	0,65	5,04	0,560	3,505
	6.- $bh=exp(-0,39245+0,35256*\ln dap^2*h)$	0,48	6,07	0,889	4,245
Ramas	7.- $br=-15,87058+1,51208*dap$	0,75	4,92	0,000	3,787
	8.- $br=-15,23246+2,000293*dap-0,59735*h$	0,78	4,59	0,052	3,379
	9.- $br=3,37899+2,00128*dap^2*h$	0,67	9,05	6,767	7,373
	10.-$br=exp(-4,86294+2,45835*\ln dap)$	0,83	4,71	0,475	3,376
	11.- $\ln br=-5,00513+3,02075*\ln dap-0,54138*\ln h$	0,84	4,78	0,314	3,337
	12.- $\ln br=-4,21342+0,75846*\ln dap^2*h$	0,75	5,69	0,840	4,141
fuste con corteza	13.- $bfcc=-185,70985+15,61754*dap$	0,89	26,88	0,000	20,350
	14.- $bfcc=-185,83367+10,85466*dap+5,52953*h$	0,93	21,2	0,000	16,802
	15.- $bfcc=12,35342+0,01398*dap^2*h$	0,97	15,02	0,028	9,816
	16.- $bfcc=exp(-3,88726+2,8628*\ln dap)$	0,92	32,92	0,299	18,681
	17.- $bfcc=exp(-3,36918+1,67297*\ln dap+1,07462*\ln h)$	0,98	13,21	0,356	8,418
	18.- $bfcc=exp(-3,50064+0,92867*\ln dap^2*h)$	0,98	14,47	-0,513	9,145
fuste sin corteza	19.- $bfsc=-155,52132+12,8374*dap$	0,87	24,74	-0,000	18,452
	20.- $bfsc=-155,63292+8,54391*dap+4,98458*h$	0,92	19,76	0,000	15,535
	21.- $bfsc=-6,46917+0,0116*dap^2*h$	0,96	19,23	12,961	13,619
	22.- $bfsc=exp(-4,43502+2,96536*\ln dap)$	0,91	29,48	0,496	17,144
	23.- $bfsc=exp(-3,88613+1,70478*\ln dap+1,13852*\ln h)$	0,98	12,34	0,571	7,680
	24.- $bfsc=exp(-4,05101+0,96316*\ln dap^2*h)$	0,98	13,69	0,375	8,576

bh : biomasa de hojas (kg), dap : diámetro a la altura del pecho, h : altura total (m), br : biomasa de ramas (kg), bf : biomasa fuste, R^2_{aj} : R^2 ajustado, CME: cuadrado medio del error, ER: error relativo, EA: error absoluto

Si bien los modelos de biomasa en hoja mostraron menor ajuste, debe considerarse que la proporción de biomasa foliar disminuye con la edad (Figura 2 d) y en consecuencia, la menor exactitud en la estimación de biomasa de hojas pierde relevancia en la estimación de la biomasa aérea. Sin embargo a los efectos de la estimación de dicha fracción, puede recomendarse la ecuación 5, que presentó el R^2 más elevado y un ER aceptable.

Para biomasa de ramas, (modelos de 7 a 12), los ajustes mejoraron sustancialmente, con valores de R^2 mayores a 0,75. Se recomienda el empleo del modelo más sencillo (modelo 10) que sólo incluye el *dap* en su forma doble logarítmica, dado que los valores de los criterios de selección son similares al modelo 11.

Las estimaciones de la biomasa en el fuste mostraron R^2 superiores a 0,87. Si bien los ER fueron bajos en los modelos que incluyen sólo el *dap* y *h*, el \sqrt{CME} y el EA tuvieron valores elevados. Por lo tanto, se recomienda el empleo de la ecuación 17 para la estimación del volumen con corteza y la ecuación 23 para las estimaciones del volumen sin corteza. Ambos modelos presentaron los R^2 más altos, los menores errores relativos y absolutos en relación a las otras formas consideradas.

En la literatura, las estimaciones de la ordenada al origen para muchas regresiones son no nulas y en este trabajo se tomó dicho criterio. Este parámetro suele tomar valores negativos o cercanos a cero, lo que significa que las estimaciones de biomasa para árboles pequeños tendrían un error, siendo que los individuos presentan una cantidad de biomasa ya acumulada. Para evitar esto se debe respetar los rangos de diámetros y alturas para los cuales han sido validados. Si se eliminara la ordenada al origen, los árboles menores a 1,3 m arrojarían valores de biomasa cero, lo cual es erróneo.

En la Figura 3 se observa el comportamiento de los modelos de la Tabla 5 cuando se contrastan los valores observados y los estimados, según Legendre (1998), para una regresión tipo II. El modelo seleccionado para la predicción de la biomasa en hojas, con un intervalo de confianza más amplio, denota la mayor variabilidad de las estimaciones. La mejor calidad de ajuste se logra en las estimaciones de biomasa de fuste con y sin corteza que es donde se acumula la mayor cantidad de biomasa aérea.

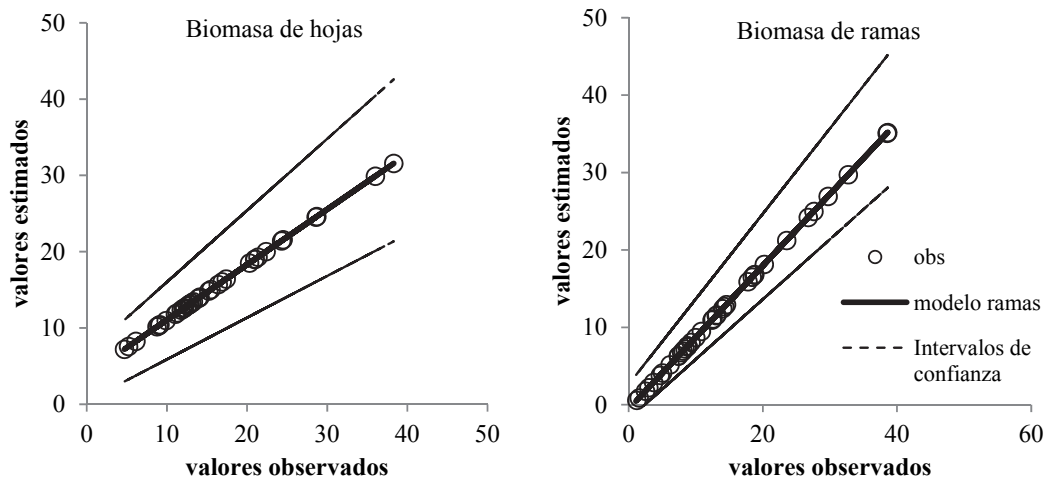


Figura 3. Valores estimados vs observados para las fracciones de biomasa aérea (hojas, ramas, fuste con y sin corteza) para árboles de *E. viminalis*. Los círculos corresponden a las observaciones, la línea central a la estimación del modelo y las laterales los intervalos de confianza.

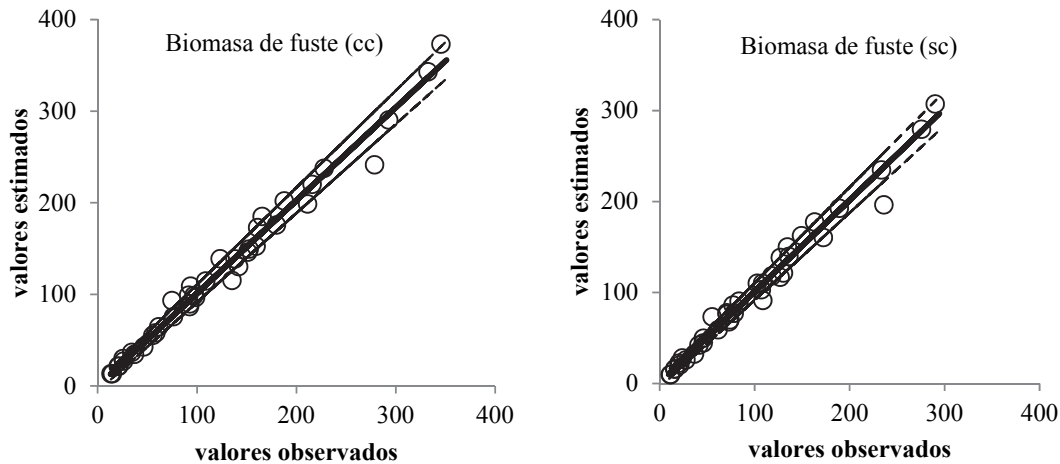


Figura 3 (Cont.). Valores estimados vs observados para las fracciones de biomasa aérea (hojas, ramas, fuste con y sin corteza) para árboles de *E. viminalis*. Los círculos corresponden a las observaciones, la línea central a la estimación del modelo y las laterales los intervalos de confianza.

Funciones de biomasa a nivel de rodal

Mediante el ajuste de modelos no lineales en función de la altura dominante es posible determinar la acumulación de biomasa aérea. Los coeficientes del modelo de Chapman-Richard, que es usualmente considerado en este tipo de estimaciones, no fueron significativos y por ello fueron descartados del análisis posterior. En la Tabla 6 se presentan los parámetros y estimadores para los modelos que cuantifican la biomasa aérea de *E. viminalis* a nivel de rodal, en función de la altura dominante. De los tres modelos considerados, el de Gompertz presenta los errores de estimación más bajos y en consecuencia se recomienda su empleo en el área de estudio. Stape (2002) trabajando con clones de *Eucalyptus* utilizó este modelo para las estimaciones de volumen del rodal, aunque incluyó la edad como variable independiente. La ventaja de emplear la H en relación a la edad sería la de captar la variación de la biomasa en relación a la productividad del sitio.

Tabla 6. Parámetros y estimadores para modelos de estimación de biomasa aérea de *E. viminalis* a nivel de rodal.

Modelos	Parámetro	Valor estimado	Error estándar	p-valor	ER	EA
Logística	β_0	324,73	25,891	<0,0001		
	β_1	92,171	30,828	0,0035	-3,49	19,28
	β_2	0,198	0,0212	<0,0001		
Gompertz	β_0	420,689	64,217	<0,0001		
	β_1	8,8120	1,989	<0,0001	-2,62	19,57
	β_2	0,097	0,017	<0,0001		
Exponencial negativa	β_0	24,154	2,395	<0,0001		
	β_1	0,081	0,004	<0,0001	-10,78	22,95

ER: error relativo, EA error absoluto.

A la luz de la potencialidad forestal que existe en la región de la pampa arenosa y la escasez de información regional sería recomendable avanzar en una red de estudios que contemplen la acumulación y producción de biomasa en diferentes esquemas de manejo, lo cual permitiría simular distintos escenarios de producción.

4. CONCLUSIONES

Los modelos ajustados resultan herramientas de aplicación directa para la estimación de la biomasa a diferentes niveles y compartimentos de *Eucalyptus viminalis* en el centro-oeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Para cuantificar las fracciones de biomasa a nivel de árbol individual se recomienda el empleo del modelo exponencial linealizado con el *dap* y *h*, aunque las ecuaciones que emplearon sólo el *dap* tuvieron niveles aceptables considerando que la estimación de la altura conlleva errores adicionales, muchas veces no considerados.

Para las estimaciones de biomasa aérea de una plantación del centro-oeste bonaerense en función de la altura dominante, los mejores resultados fueron alcanzados con la ecuación de Gompertz. Para su empleo debe considerarse una validación previa de todas las funciones presentadas.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antonio N.; M. Tomé; J. Tomé; P. Soares and L. Fontes. 2007. "Effect of tree, stand and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass". *Can. J. For. Res.* 37: 895-906.
- Barclay, H.; P. Pang and D. Pollard. 1985. "Aboveground biomass distribution within trees and stands in thinned and fertilized Douglas-fir". *Can. J. For. Res.* 16: 438-442.
- Brown, S.; A. J. R. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. "Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data". *For. Sci.* 35(4): 381-902.
- Cairnie, A. 1978. "El pasto llorón (*Eragrostis curvula*) en la alimentación de los vacunos". Boletín de divulgación técnica n° 14, EEA INTA Anguil, ISSN 0325-2167.
- Deans, J.; J. Moran and J. Grace. 1996. "Biomass relationships for tree species in regenerating semideciduos tropical moist forest in Cameroon". *For. Ecol. and Manage.* 88: 215-225.
- Diéguez-Aranda, U.; A. Rojo Alboreca; F. Castedo-Dorado, J. G. Álvarez González; M. Barrio-Anta; F. Crecente-Campo y F. Sánchez Rodríguez. 2009. "Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia". Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. 259 pgs.
- Fassola, H. E.; E. Crechi; S. R. Barth; A. E. Keller; R. A. Winck; R. Martiarena; A. Von Wallis; M.A. Pinazo y O. Knebel. 2010. "Modelos regionales de biomasa aérea de *Pinus taeda* para Misiones y NE de corrientes, Argentina". 14^{as} Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. F.C.F, UNaM - EEA Montecarlo, El Dorado, Misiones, Argentina.
- Ferrere, P.; A. M. Lupi; T. Boca; V. Nakama y A. Alfieri. 2008. "Biomasa en plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill de la provincia de Buenos Aires, Argentina". *Ciência Florestal* 18 (3): 291-305.
- Forest Service. 1994. "Fire wood from Victoria's Forest Research & Development", N° 26 [fecha de consulta mayo 2008]. Forest Research and Development Branch. Disponible en: <<http://www.recycledfuels.com.au/Content/firewood.pdf>>.
- García, O. y F. Ruiz. 2003. "A growth model for eucalypt in Galicia, Spain". *For. Ecol. and Manage.* 173: 49-62.
- Gatto, D., Santini E. J.; Haselein C. R. y Durló M. A. 2003. "Características da lenha produzida na região da quarta colônia de imigração italiana do Rio Grande Do Sul". *Ciência Florestal*, Santa Maria, 13 (2) 7-16.
- Goya, J. F.; J. Frangi; F. Dalla Tea; M. A. Marco y F. Larrocca. 1997. "Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en Plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el NE de la provincia de Entre Ríos". XII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos. 19 p.
- Guo, L. B.; R. E. H. Simsa y D. J. Horne. 2006. "Biomass production and nutrient cycling in *Eucalyptus* short rotation energy forests in New Zealand: II. Litter fall and nutrient return". *For. Ecol. and Manage.* 30(5): 393-404.

- Hurtado, M. A.; G. Moscatelli y R. Godagnone. 2005. “Los suelos de la provincia de Buenos Aires”. Actas de 16 Congreso Geológico Argentino, La Plata, 201-218.
- Husch, B. 2001. “Estimación del contenido de carbono de los bosques”. Simposio internacional de medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, 18 al 20 de octubre, Valdivia, Chile, 13 p.
- Iglesias M. R. y A. H. Barchuk. 2010. “Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido”. *Ecología Austral* 20: 71-79.
- INTA 1990. “Carta de Suelos de la República Argentina”. Escala 1: 50.000.
- Kottek M.; J. Grieser; C. Beck; B. Rudolf and F. Rubel. 2006. “World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated”. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3): 259-263.
- Laclau, J. P.; J. P. Bouillet y J. Ranger. 2000. “Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of eucalyptus in Congo”. *For. Ecol. and Manage.* 128:181-196.
- Legendre, P. 1998. *Model II regression user’s guide*, R edition. R Vignette.
- Lundgren, A. L. y W. A. Dolid. 1970. “Biological growth functions describe published site index curves for Lake States timber species”. Research Paper NC-36. St. Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 9 p.
- Lupi, A. M.; M. Angelini y P. Ferrere. 2013. “Tierras elegibles para cultivos forestales según el protocolo de Kyoto en dos partidos de la provincia de Buenos Aires, Argentina”. *Revista RIA*. [fecha de consulta: 8 de mayo de 2013]. Disponible en: <<http://ria.inta.gov.ar/wp-content/uploads/2013/05/Cn-10086-Lupi-castellano-2.pdf>>
- Méndez-González, J.; L. Luckie-Navarrete1, M. A. Capó-Arteaga, J. A. Nájera-Luna. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrabus* Lindl. en Guanajuato, México. *Agrociencia*, V45, n° 4.
- Montagu, K.; K. Düttmer; C. Barton and A. Cowie. 2005. “Developing general allometric relationships for regional estimates of carbon sequestration - an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites”. *For. Ecol. and Manage* 204: 113–127.
- Muñoz Riveros, C.; C. J. Cancino y B. M. Espinosa. 2005. “Análisis de biomasa del vuelo de un rodal adulto de *Pinus radiata*”. *Bosque* 26 (3): 33-44.
- Myers, R. H. 1990. *Classical and modern regression with applications*. PWS-Kent Publishing Company. 488 p.
- Navar, J.; N. Gonzales y J. Graciano. 2001. “Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México”. Simposio Internacional Medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, Valdivia, Chile. 12 p.
- Pilli, R.; T. Anfodillo and M. Carrer. 2006. “Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass”. *For. Ecol. and Manage.* 237: 583-593.
- Pinheiro J. C. and D. Bates. 2000. “Mixed-Effects Models in S and S-PLUS, Statistics and Computing Series”. Springer-Verlag, New York, NY.
- Porté, A.; P. Trichet; D. Bert and D. Loustau. 2002. “Allometric relationship for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)”. *For. Ecol. and Manage.* 158: 71-83
- Prodan, M.; R. Peters; F. Cox y P. Real. 1997. “Mensura Forestal”. Ed. Iica, 586 P.
- R Development Core Team. 2013. R: “A language and environment for statistical computing”. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0. Disponible en: <<http://www.R-project.org>>
- Repetti, R. 1990. Aptitud tecnológica de los Eucaliptos: *E. globulus*, *E. viminalis*, *E. saligna* y *E. grandis* para su utilización en la elaboración de pastas kraft. En actas: Jornadas sobre Eucalyptus para la Región Pampeana. Centro de Investigaciones y Experiencias Forestales (CIEF). Buenos Aires, Argentina 23 y 24 de julio de 1990.

- Rodríguez Laguna, R.; J. Jimenez Perez; O. Aguirre Calderon y E. Jurado Ibarra. 2007. "Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N.L". Ciencia Forestal en México 32 (101): 39-56
- Saint-André, L.; A. M'Bou; A. Mabiala; W. Mouvondy; C. Jourdan; O. Roupsard; P. Deleporte; O. Hamel and Y. Nouvellon. 2005. "Age-related equations for above- and below biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo". For. Ecol. and Manage. 205 (1): 199-214
- Sampaio, E. V. S and G. C. Silva. 2005. "Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants". Acta Bot. Bras. 19(4): 935-943.
- Schönau, A. and Boden, D. 1981. "Preliminary biomass studies in young eucalypts". Working party on forest biomass, IUFRO World congress, Kyoto, Japan, p. 51-58.
- Segura M.; M. Kanninen and D. Suárez. 2006. "Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together". Agroforestry Systems 68 (2): 143-150.
- Senelwa, K. and R. E. Sims. 1998. "Tree biomass equations for short rotation eucalypts grown in New Zealand". Biomass and Bioenergy 13 (3): 133-140.
- Snowdon, P.; D. Eamus; P. Gibbons; P. Khana; H. Keith; J. Raison and M. Kirschbaum. 2000. "Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies". T 17. National Carbon Accounting System.
- Soares P. y M. Tome. 2004. "Analysis of the effectiveness of biomass expansion factors to estimate stand biomass". In: Hasenauer H., Makela A. (eds), Modeling forest production. Dep. Forest and Soil Sciences, BOKU Univ. Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, 368-374.
- Soares, P. y M. Tome. 2012. "Biomass expansion factors for *Eucalyptus globulus* stands in Portugal". Forest Systems 21(1): 141-152.
- Specht, A. y P. W. West. 2003. "Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantations in northern New South Wales, Australia". Biomass and Bioenergy, 25(4): 363-379.
- Stape, J. L. 2002. "Production ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in northeastern Brazil". Fort Collins, Colorado State University, Ph.D. Thesis. 225p.
- Usuga, J. C.; J. A. Rodríguez Toro, V. Ramírez Alzate and Á.J. Lema Tapia. 2010. "Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests". For. Ecol. and Manage. 260: 1906-1913.
- Vidal, A.; J. Y. Benítez; J. Rodríguez; R. Carlos and H. Gra. 2003. "Estimation of crown biomass for standing trees of *P. caribaea* var. *caribaea* in the forest integrated enterprise "La Palma" in the Pinar del Río province, Cuba". Quebracho 11: 60-66.
- Weber, D. C. and J. H. Skillings. 2000. "A First Course in the Design of Experiments, A linear model approach". Oxford: Miami University; Ohio: CRC Press.

