

ECUACIONES DE BIOMASA AÉREA, FACTORES DE EXPANSIÓN Y DE REDUCCIÓN DE LA LENGA *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser, EN EL SO DEL CHUBUT, ARGENTINA

Gabriel A. Loguercio & Guillermo Defossé

Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino-patagónico
Ruta 259. Km 4. Esquel. Chubut, Argentina
Tel/fax 0054-2945-453948
e-mail: gloguer@ciefap.cyt.edu.ar

RESUMEN

La lenga es la especie forestal más importante de los bosques nativos andino-patagónicos argentinos. A fin de poder estimar carbono en árboles de lenga en pie se elaboraron funciones de biomasa aérea en base a un muestreo destructivo de 59 árboles en dos estructuras típicas del bosque de lenga virgen (regular e irregular) en las cercanías del Lago La Plata en la Prov. del Chubut. Se ajustaron funciones de biomasa neta, que es la real, y de biomasa bruta, que es la teórica que tendría el fuste si las pudriciones (que comúnmente afectan a la lenga) tuvieran la densidad de la madera sana. Para la base de datos del ajuste se utilizaron el 80 % de los árboles, mientras que el 20 % restante se utilizó para su validación. Se probaron 10 funciones de las más citadas en la literatura para la estimación de biomasa, realizando el análisis estadístico mediante el índice de Furnival, el r^2 , la distribución de residuos, análisis del error y sesgo. Las formas de las funciones seleccionadas fueron $Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2$ y $Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 H$. Por otro lado, a fin de poder estimar la biomasa aérea de rodales en base a información de inventarios forestales preexistentes, se elaboraron coeficientes técnicos de expansión, que relacionan el volumen del fuste con la biomasa aérea, y coeficientes de reducción, que descuentan la pérdida de biomasa por efecto de las pudriciones. El factor de expansión tiende a disminuir con el aumento del DAP. Agrupados en clases diamétricas los factores de expansión aérea van de 2,173 para DAP entre 11-20 cm a 1,139 para DAP > 51 cm. Con las ecuaciones de biomasa y los coeficientes técnicos obtenidos en el presente estudio, se está en condiciones de estimar el carbono almacenado en bosques de lenga del SO de la provincia del Chubut en base a la información provista por inventarios forestales.

INTRODUCCIÓN

Existe abundante experiencia en el campo forestal, sobre las técnicas para estimar el volumen (total y comercial) y los crecimientos que experimenta un bosque a lo largo del tiempo. A partir de ellas se ha generado mucha información que constituye una base muy útil a la hora de realizar estimaciones de la capacidad de fijación de carbono en un bosque. Para la transformación de ese volumen de fustes estimado mediante inventarios forestales, en valores de biomasa total son necesarios coeficientes técnicos, que representan la relación porcentual entre ambas medidas. Son los denominados Factores de expansión.

Por otro lado, si se quiere estimar el carbono existente en base a un nuevo inventario, son útiles las funciones de biomasa. Estas son ecuaciones que permiten determinar la biomasa de cada árbol a partir de variables de fácil medición (DAP, altura, etc.) y bajo costo. Pueden tener validez local o regional, pueden estar definidas por especie o grupo de especies, por zona climática o por grandes grupos botánicos (ej. latifoliadas y coníferas) (Schroeder *et al.* 1997).

La lenga es la especie forestal nativa que ocupa más superficie de los bosques andino patagónicos. Para poder evaluar el carbono almacenado en los árboles en pie y su dinámica en los bosques de esta especie, es necesario desarrollar las herramientas antes mencionadas. En el caso de la lenga la biomasa se ve reducida debido a la presencia de pudriciones de la madera (castaña y blanca). Para la estimación de la biomasa a partir del conocimiento del volumen es necesario entonces, además del coeficiente de expansión, elaborar Factores de reducción, que expresan tal relación.

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo fueron:

- a) Ajustar funciones de biomasa aérea para la estimación de carbono en árboles de lenga en pie
- b) Elaborar factores técnicos de expansión y reducción de biomasa para estimar carbono en bosques de lenga a partir de información de inventarios forestales

METODOLOGÍA

Selección de árboles muestra

Se efectuó un muestreo destructivo en un bosque virgen de lenga de calidad de sitio media, ubicado en las cercanías del lago La Plata (Prov. del Chubut), sobre dos rodales con estructuras típicas del tipo forestal -regular e irregular- (Bava 1999). Basado en una selección al azar, se apearon un total de 59 lengas de distintas posiciones sociológicas y en un amplio rango de clases diamétricas, cubriendo de 10 a 90 cm de DAP.

Determinación de biomasa del fuste y ramas principales

La biomasa del fuste y ramas principales de cada árbol se obtuvo en base a la determinación del volumen y la densidad de los diferentes componentes de la madera y su estado sanitario, como se describe en Loguercio *et al.* (2001).

Biomasa de la copa (ramas secundarias y hojas)

La biomasa de la copa de cada árbol, formada por las ramas con diámetro menor a 10 cm y las hojas, se determinó por pesadas en el campo. Para convertir los valores a peso seco, se determinó el contenido de humedad en alícuotas secadas en estufa a 105 °C hasta peso constante.

Análisis de regresión

Se realizaron análisis de regresión entre la biomasa aérea (fuste+copa) como variable dependiente y el DAP y la altura como variables independientes. La base de árboles muestra utilizados para el ajuste lo constituyó el 80 % de los individuos apeados. Estos fueron seleccionados al azar, pero con la restricción que todas las clases diamétricas (de 10 cm) deberían estar representadas en la muestra. El 20 % de los árboles restantes se utilizaron para la validación de las funciones. La tabla 1 muestra la lista de los modelos probados.

Tabla 1: Modelos de biomasa utilizados para el análisis de regresión

Función	Fuente bibliográfica
$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2$	Teller (1998)
$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2$	Brown (1997)
$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 * H$	Clutter (1992)
$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * H$	Elliot y Clinton (1993)
$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * H$	Elliot y Clinton (1993)
$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * H + \beta_3 * DAP^2 * H$	Clutter <i>et al.</i> (1992)
$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 * DAP^{\beta_2} * H^{\beta_3}$	Clutter <i>et al.</i> (1992)
$Biomasa = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * H^{\beta_2}$	Clutter <i>et al.</i> (1992)
$Biomasa = \beta_0 * DAP^{\beta}$	Wang <i>et al.</i> (2000)

El análisis de regresión se realizó en base al r^2 , la significancia de los coeficientes y la distribución de residuos, mientras que la selección de los modelos se hizo en base al índice de Furnival. Debido a que la relación de las variables independientes utilizadas presenta heterocedasticidad con las variables dependientes (sobre todo respecto al DAP), las funciones fueron ponderadas mediante $1/DAP$, $1/DAP^2$, $1/DAP^3$, $1/DAP^4$, $1/DAP^5$, y las que utilizaban variables combinadas, además, con $1/DAP^2 * H$; $1/DAP^4 * H^2$. La validación de las funciones se realizó mediante medidas de error y sesgo. El primero se midió por la raíz del error cuadrático medio (REMC) y el segundo mediante la diferencia agregada (DIFA). Ambos fueron además expresados en forma relativa respecto a la media de los valores observados.

Coeficientes de reducción y expansión de biomasa

En los bosques naturales, es normal que parte de los tejidos de los árboles vivos estén afectados por hongos degradadores de la madera que ocasionan pudriciones del tipo castaña y blanca, como en el caso de la lenga. A fin de considerar su incidencia sobre la biomasa es necesario presentar algunas definiciones particulares desarrolladas para el presente estudio.

La biomasa neta del fuste y ramas principales (B_{nfr}) se diferencia de su respectiva biomasa bruta (B_{bfr}), siendo esta última la teórica que alcanzaría el fuste (o el árbol) si el volumen de la madera no fuese afectada por pudriciones, o que estas tuviesen la misma densidad que la madera sana (Loguercio *et al.* 2001).

La determinación de la B_{bfr} a partir de datos de inventarios forestales se obtiene multiplicando el volumen estimado por la densidad media de la madera sana. Para estimar la B_{nfr} a partir de la B_{bfr} es necesario realizar una reducción por las pérdidas producidas por las pudriciones. A esta relación la denominamos Factor de reducción (F_r) y se obtiene mediante:

$$F_r = B_{nfr} / B_{bfr}$$

Por otro lado, para estimar la biomasa total del árbol (fuste+copa+raíces) a partir de datos de inventarios forestales, debe conocerse la relación entre la B_{nfr} y la suma de la biomasa de la copa (B_c) (ramas secundarias con diámetro <10 cm + hojas) más la biomasa de las raíces (B_{sub}). Esta relación se expresa mediante el Factor de expansión (F_{exp}). La fórmula es:

$$F_{exp} = (B_{nfr} + B_c + B_{sub}) / B_{nfr}$$

Debido a que en este estudio se determinó la B_{nfr} y B_c , mientras que la B_{sub} fue estimada por fórmula, se obtuvieron valores por separado de los factores de expansión aérea ($F_{exp \text{ aérea}}$) y total ($F_{exp \text{ total}}$). La biomasa de raíces fue estimada en base a la siguiente función:

$$\text{Ln}B_{sub} = 7,9124 - 23,3104 * \text{DAP}^{-0,5} + 13,2689 * \text{DAP}^{-1} \quad \text{Weber (1999)}$$

Donde $\text{Ln}B_{sub}$: logaritmo de la biomasa subterránea

RESULTADOS

Funciones de biomasa

Las funciones de biomasa que presentaron el mejor ajuste, considerando el Índice de Furnival, fueron las siguientes:

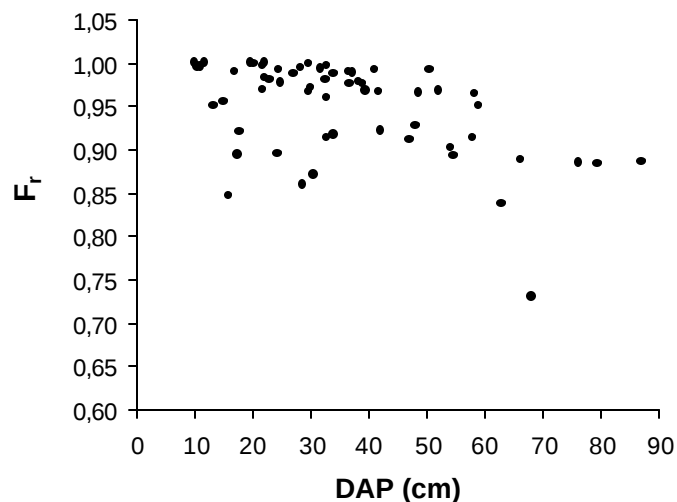
Identificador	Biomasa bruta del fuste=
I	$40,490983 - 8,315061 * DAP + 0,530177 * DAP^2$
II	$-13,701279 + 0,019683 * DAP^2 H$
IIII	$20,144103 - 0,024770 * DAP^2 - 3,039345 * H + 0,021664 * DAP^2 H$
	Biomasa neta del fuste=
I	$27,845249 - 6,567465 * DAP + 0,471160 * DAP^2$
I	$-11,689875 + 0,018413 * DAP^2 H$
III	$15,072990 - 0,036556 * DAP^2 - 2,840236 * H + 0,017416 * DAP^2 H$
	Biomasa total aérea=
I	$32,648852 - 5,676172 * DAP + 0,510863 * DAP^2$
II	$5,025173 + 0,021553 * DAP^2 H$
III	$7,670942 + 0,089290 * DAP^2 - 0,822793 * H + 0,017032 * DAP^2 H$
IV	$0,032658570 * DAP^{1,963079245} * H^{0,907562431}$

Los valores del Índice de Furnival, así como los de la REMC y la DIFA de las funciones que presentaron el mejor comportamiento se presentan en la tabla 2. Se observa que los ranking de los valores REMC y DIFA para cada biomasa (total aérea, bruta y neta del fuste) son diferentes entre si y respecto al del Índice de Furnival. A continuación priorizamos a la función que presentó el menor sesgo de estimaciones (siendo los valores de DIFA% bajos y similares). La función II ($y = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 H$) es la mejor rankeada para la biomasa total y neta del fuste y en segundo lugar para la biomasa bruta del fuste. Si además consideramos su simplicidad respecto a las otras que utilizan la variable combinada, concluimos que esta es la más apropiada para realizar estimaciones. Para las tres clases de biomasa la función subestima levemente, como lo expresa el DIFA% de 1,4 para la biomasa neta del fuste, 3,2 para la biomasa bruta del fuste y 0,01 para la biomasa total aérea.

Tabla 2: Índice de Furnival, REMC y DIFA de las funciones de biomasa del fuste que presentaron los mejores ajustes

Biomasa neta del fuste	Pond.	I. Furnival	Rank.	Remc	Remc%	Rank.	DIFA	DIFA%	Rank.
I	1/D4	41,2	2	101,2	15,3	3	-23,4	-3,5	3
II	1/D4	41,5	3	33,3	5	1	9,1	1,4	1
III	1/D4	39,6	1	35,7	5,4	2	17,3	2,6	2
Biomasa bruta del fuste									
I	1/D4	39,8	1	91,6	12,7	3	-59,2	-8,2	3
II	1/D5	44,6	3	66,0	9,2	2	23,1	3,2	2
III	1/D4	40,6	2	52,8	7,3	1	19,7	2,7	1
Biomasa total aérea									
I	1/D4	48,9	4	130,9	16,7	4	-61,5	-7,8	4
II	1/D4	46,4	2	59,2	7,6	2	0,1	0,01	1
III	1/D4	46,3	1	59,9	7,6	3	-10	-1,3	3
IV	1/D4	46,7	3	48,3	6,2	1	1,3	0,2	2

La figura 1 muestra la expresión gráfica de las funciones de biomasa bruta y neta del fuste, (modelo biomasa (kg/árbol)= $\beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 DAP^2$). En esta figura se observa como aumenta la diferencia entre la biomasa bruta y neta en los árboles de mayor tamaño, debido al incremento de la participación de las pudriciones. Por ejemplo, para un DAP de 20 cm la biomasa neta se redujo un 1,6 % respecto a la biomasa bruta, mientras que para un DAP de 80 cm la diferencia es del 9 %.

**Figura 1:** Funciones de biomasa bruta y neta del fuste en relación al DAP

Coeficientes de reducción y expansión

El F_r varía considerablemente de árbol a árbol, en todas las clases diamétricas. Como se observa en la figura 2, tiende a ser menor en los árboles de mayores dimensiones, sobre todo a partir de 50-60 cm, donde no supera el valor de 0,9.

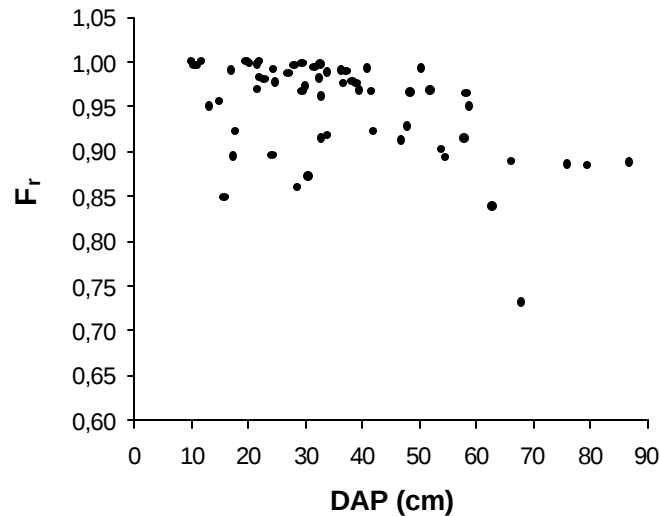


Figura 2: Factores de reducción en relación al DAP

La relación entre el Factor de expansión y el DAP es asintótica, como se ve en la figura 3. Presenta más variación para los árboles de menor DAP (< 30 cm), y tiende a la unidad en la medida que este se incrementa.

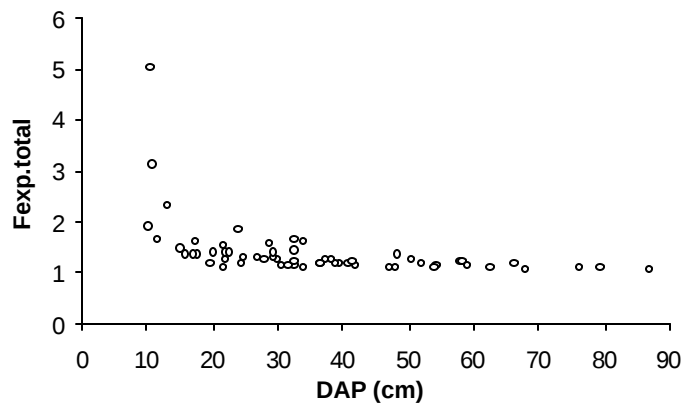


Figura 3: Factores de expansión en relación al DAP

A los fines prácticos, para ser aplicado a la transformación del volumen obtenido de inventarios a biomasa, se elaboraron los factores de expansión y reducción de biomasa por clases diamétricas. En la tabla 3 se presentan los valores promedios y el total de los Factores de expansión aérea y de los Factores de expansión total (aérea + subterránea) por clase diamétrica.

Tabla 3: Valores discretos de los coeficientes técnicos de biomasa

DAP (cm)	n	F _{exp. aérea}		F _{exp. total}	
		$\bar{x}$	CV (%)	$\bar{x}$	CV (%)
11-20	11	2,173	50,3	2,768	51,1
21-30	15	1,376	12,8	1,662	11,1
31-40	14	1,273	13,9	1,491	14,0
41-50	6	1,187	8,2	1,360	8,2
>51	13	1,139	5,8	1,266	6,2
Total	59	1,429	41,9	1,710	47,1

La tabla 4 muestra los valores promedios (y los coeficientes de variación) del Factor de reducción por clase diamétrica y el total.

Tabla 4: Valores discretos de los Factores de reducción de biomasa por clase diamétrica

DAP (cm)	F _{reducción}	CV (%)
11-30	0,963	4,9
31-50	0,964	3,1
51-70	0,904	8,5
> 71	0,885	0,2
Total	0,949	5,7

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De las funciones ajustadas para la estimación de biomasa aérea total, bruta y neta, se seleccionaron las tres (cuatro en el caso de la biomasa total aérea) que presentaron los valores más bajos del Índice de Furnival. El ranking de los valores de REMC y DIFA son variables, pero en general aceptables. Por su simplicidad se recomienda la función $\text{biomasa} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2$, que presenta un REMC% entre 5 y 9 % y un DIFA% entre 0,01 y 3,2 %. Para muestreos en los cuales solo se utilice el DAP como variable independiente se propone la función $\text{biomasa} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP} + \beta_2 \cdot \text{DAP}^2$, aunque el error involucrado es algo mayor. A través de estos modelos se elaboraron las funciones de biomasa bruta y neta que permiten estimar las pérdidas de carbono en bosques de lenga por efecto de las pudriciones.

Respecto a los factores técnicos de expansión, estos se reducen en la medida que aumenta el DAP. Esta observación coincide con la generalización realizada por Schroeder *et al.* (1997) para los bosques de zonas templadas. De la distribución de biomasa de un bosque de lenga virgen de Tierra del Fuego reportada por Richter y Frangi (1992), se deduce un factor de expansión total de 1,535. Este se encuentra se corresponde con los valores de las clases intermedias entre 20 y 40 cm de DAP- en el presente estudio.

Weber estimó la biomasa del fuste en bosques de lenga de Tierra del Fuego. El asumió una distribución teórica de las pudriciones (de las que determinó la densidad en probetas) por clase diamétrica. En base a sus resultados calculamos los Factores de reducción de biomasa del fuste por clase diamétrica. Estos resultaron muy similares a los obtenidos en el presente estudio para las clases diamétrica entre 31 y 70 cm. En la clase de DAP < 30 cm y > 71 cm las diferencias fueron algo superiores. Esta observación será corroborada en un estudio que actualmente estamos realizando en la Provincia de Tierra del Fuego para la elaboración de funciones de biomasa de lenga de validez regional.

BIBLIOGRAFIA

- BROWN S. 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. FAO. Forestry Paper 134, Rome, Italy.
- CLUTTER J., J. FORSTON, L. PIENAAR, G. BRISTER, R. BAILEY, 1992. Timber Management. A quantitative approach. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida.
- ELLIOT K. J. & B. D. CLINTON, 1993. Equations for Estimating Biomass of Herbaceous and Woody Vegetation Early-Succesional Southern Appalachian Pine-Hardwood Forests. Southeastern Forest Experiment Station. Research Note SE-365. Forest Service. USA.
- LOGUERCIO G. A., A. JOVANOVSKI M., A. E. ASENJO, 2001. Pérdidas de biomasa en árboles vivos de lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser por efecto de las pudriciones de la madera. Un método de cuantificación. Simposio Internacional "Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales". 18 al 20 de octubre, 2001. Valdivia, Chile.
- MACDICKEN K.G., 1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Forest Carbon Monitoring Program. Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI). <http://www.winrock.org/REEP/PUBSS.html>.
- RICHTER L., & FRANGI J., 1992. Bases ecológicas para el manejo del bosque de *Nothofagus pumilio* de Tierra del Fuego. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata. 68: 35-52

- SCHROEDER P., S. BROWN, J. M.O., R. BIRDSEY & C. CIESZEWSKI, 1997. Biomass Estimation for Temperate Broadleaf Forests of the United States Using Inventory Data. Forest Science, Vol 43, N° 3: 424-434.
- TELLER A. 1988. Biomass, productivity and wood waste evaluation in a spruce (*Picea abies*) forest (Strainchamps 1983). Commonw. For. Rev. 67(2).
- WANG J. R., T. LETCHFORD, P. CORMEAU, J.P. KIMMINS. Above- and below-ground biomass and nutrient distribution of a paper birch and subalpine fir mixed-species stand in the Sub-Boreal Spruce zone of British Columbia. Forest Ecology and Management 130 (2000) 17-26.
- WEBER M., 1999. Kohlenstoffvorräte eines *Nothofagus*-Primärwaldes auf Feuerland. Forstw. Cbl. 118(1999): 156-166.