

# FUNCIONES DE RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO EN PIE Y EN ASERRADERO PARA LA LENGUA (*Nothofagus pumilio*)

Martínez Pastur, G.<sup>1</sup>; Cellini, J. M.<sup>2</sup>; Lencinas, M.V.<sup>1</sup>; Díaz, B.<sup>2</sup>; Peri P.L.<sup>3</sup> y Vukasovic, R.F.<sup>4</sup>

## RESUMEN

Una tarea compleja y azarosa al realizar inventarios forestales en bosques de *Nothofagus pumilio* es estimar volúmenes aprovechables en pie, así como el rendimiento de un aserradero en función de las trozas a procesar. Los objetivos del presente trabajo fueron desarrollar un sistema de ecuaciones para estimar el rendimiento volumétrico de un bosque de *N. pumilio* a lo largo de un rango de calidades de sitio, a partir de variables de fácil obtención en árboles en pie, y estimar funciones de rendimiento de madera procesada para un aserradero mediano en Tierra del Fuego. Utilizando variables de uso corriente en inventarios (DAP, clase social, sanidad, forma y obtención de fustes) y durante la fiscalización del aprovechamiento (diámetro y largo de las trozas), se pudieron desarrollar modelos sencillos de fácil construcción. El modelo propuesto para el cálculo de volumen de trozas en árboles en pie contiene dos componentes: un discriminante ( $I$ ) que pondera a una ecuación ( $M$ ) que se aplica a árboles individuales; mientras que el modelo de rendimiento de un aserradero quedó conformado por variables simples (largo y diámetro). Estos modelos brindan parte de la información necesaria para una mejor planificación en el aprovechamiento de nuestro recurso forestal, siendo una eficaz herramienta para la realización de planes de manejo.

**Palabras claves:** volumen aprovechable, volumen aserrable, modelos biométricos, Tierra del Fuego, Patagonia.

## SUMMARY

The volume of logs to be harvested in a *Nothofagus pumilio* forest and the sawn-timber yield after processing in sawmill are often difficult to estimate. The aims of this work were to develop a mathematical model to estimate the timber volume of a *N. pumilio* forest (along a site quality classes) from simple variables of standing-trees, and to develop a function to predict the yield of a medium-scale sawmill in Tierra del Fuego. Variables from current forest inventories (DBH, crown classes, health, stem form and stem extraction possibility) and yield measurements (diameter and length of logs) were used to fit the models. The proposed yield-log model of standing-trees had two components: one discriminate ( $I$ ), which weigh up an equation ( $M$ ) to be applied to the individual trees. The sawmill yield model were finally conformed for simply variables, as length and diameter of logs. These equations provide the necessary information required to improve the management of our forest resource, and could be an efficient tool for the implementation of a forest management.

**Key words:** log volume, saw timber volume, biometric models, Tierra del Fuego, Patagonia.

---

<sup>1</sup> Centro Austral de Investigaciones Científicas (CONICET), CADIC. Cc 92 (9410) Ushuaia (Tierra del Fuego), Argentina, E-mail: cadicforestal@arnet.com.ar

<sup>2</sup> Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina

<sup>3</sup> PhD student, Lincoln University, New Zealand. Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina.

<sup>4</sup> Consultora "Servicios Forestales", Argentina

## INTRODUCCIÓN

El inventario forestal es la herramienta fundamental en la toma de decisiones dentro de un Plan de Manejo, siendo la estimación del volumen aprovechable en pie uno de sus objetivos principales. En los bosques de *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser ("lenga") estas estimaciones se han convertido en una tarea compleja y azarosa a la hora de cuantificar los volúmenes aprovechables para una industria determinada.

Usualmente se estima el volumen total del bosque a partir de modelos biométricos (Martínez Pastur et al., 1993; Peri et al., 1997) y se lo clasifica de acuerdo a diferentes parámetros estructurales (frecuencias diamétricas, fases de desarrollo, clases de copa, forma del fuste y sanidad del árbol). A partir de estas clasificaciones se estima un "volumen aprovechable" por rodal de acuerdo a la experiencia del técnico forestal. Los resultados que se obtienen son muy variables dependiendo de las estimaciones llevadas a cabo en el campo, siendo poco confiables y precisas, por lo que rara vez son utilizadas cuando se requiere una correcta planificación del manejo forestal. El carácter subjetivo, intrínseco a la estimación visual realizada, convierte a dicha estimación en un factor de distorsión en la evaluación de las existencias reales (Piterbarg, 1965).

En los últimos diez años se han desarrollado distintas metodologías tendientes a aumentar la precisión en la estimación de los volúmenes aprovechables a partir de árboles en pie (Chauchard y Carabelli, 1992; Chauchard y González Peñalba, 1993). Estos sistemas apuntan a eliminar parte de la subjetividad del técnico forestal mediante una normativa de clasificación de volúmenes y asignación de descuentos a partir de códigos. Sin embargo, estas metodologías incluyen estimaciones cuantitativas muy difíciles de ejecutar, como el volumen de porciones del fuste en pie para realizar los descuentos (largos y diámetros de inicio y finalización), y clasificaciones minuciosas árbol por árbol, lo que aumenta la complejidad y el costo del inventario. Por otra parte, los descuentos a realizar son tareas de estimaciones engorrosas e imprecisas.

Los mismos problemas de estimación del rendimiento en el bosque, se presentan en la

industria primaria. En los aserraderos se calcula el rendimiento a partir de un cociente entre una estimación del volumen de trozas que ingresa y el producto bruto de madera aserrada que egresa. Este porcentaje (como un valor constante) se utiliza posteriormente para la planificación y análisis económico de la empresa. Sin embargo, el diámetro, el largo, la forma y la sanidad de las trozas, la fase de desarrollo del árbol de donde provinieron y la posición de la troza en el fuste, influyen diferencialmente sobre el rendimiento del aserradero (Donoso y Caldentey, 1996). Esto significa que es posible obtener diferentes rendimientos de acuerdo a los distintos tipos de trozas que el aserradero vaya a procesar. Por otra parte, la diferencia que se observa entre calidades de sitios influye significativamente sobre la estructura forestal y en consecuencia sobre la producción de trozas, tanto a nivel individual como de rodal (Martínez Pastur et al., 2000), y posteriormente sobre los rendimientos del aserradero.

Los objetivos del presente trabajo fueron: (1) desarrollar un sistema de ecuaciones a partir de variables de fácil obtención durante la realización de un inventario forestal, para estimar el rendimiento volumétrico de árboles en pie en bosques de *Nothofagus pumilio* que serán aprovechados mediante un sistema de "cortas de protección" a lo largo de un gradiente de calidades de sitio, y (2) estimar funciones de rendimiento de madera procesada para un aserradero mediano en Tierra del Fuego (Argentina).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del ensayo y toma de la muestra

Se trabajó en un bosque puro de *N. pumilio* del establecimiento San Justo (Tierra del Fuego - Argentina) y en las instalaciones del aserradero "Los Cóndores" S.R.L. (54°06' S, 68°37' O). Esta empresa realiza el aprovechamiento de los bosques de acuerdo a la reglamentación de la Ley Provincial N° 145, utilizando como método de reproducción al monte alto, bajo cubierta protectora. Para ello realiza "cortas de protección" (Schmidt y Urzúa, 1982), dejando en pie 30 m<sup>2</sup>/ha de área basal, con distancias entre árboles de hasta diez metros.

Para este estudio se seleccionaron cinco rodales representativos a lo largo de un gradiente de calidades de sitio, de acuerdo a la clasificación planteada por Martínez Pastur *et al.* (1997a). El rango muestreado fue desde un rodal de calidad de sitio *V* (altura dominante en fase de envejecimiento de hasta 14 m) hasta un rodal de calidad de sitio *I* (altura dominante en fase de envejecimiento de más de 28 m). En cada rodal se delimitó una superficie homogénea de media hectárea, que presentara una densidad completa (índice de densidad de rodales, *IDR* > 80%, Fernández *et al.*, 1997). La superficie de muestreo de cada rodal fue dividida en cinco unidades contiguas de 1000 m<sup>2</sup> que fueron utilizadas como unidades de muestreo para evaluar la estructura forestal. Posteriormente se realizó el inventario forestal, en el que se midió la calidad de sitio del rodal, mientras que para cada uno de los individuos se determinó el diámetro normal a 1,3 m (*DAP*), la clase de copa o posición sociológica, la aptitud maderera del árbol, la fase de desarrollo, la sanidad externa y la forma del fuste del árbol en pie. Cada individuo fue numerado en la base y en el fuste para su posterior identificación. Se realizó la marcación de los árboles semilleros con un anillo de color rojo de acuerdo al tratamiento de corta de protección planteado, y durante el volteo se apearon la totalidad del resto de los individuos. Luego del corte se realizaron las mediciones del volumen de trozas producido por cada árbol. El mismo estuvo compuesto por piezas maderables cuyo destino final fue el aserrado. Las mismas fueron procesadas por una cuadrilla de dos motosierristas y rastreadas por un tractor forestal mediante cables de acero hasta una cancha de acopio, utilizando el método de aprovechamiento mediante fustes completos propuesto por Cellini *et al.* (1998). Para ser aceptadas, las trozas faenadas debían tener de 3 a 7 metros de largo, no menos de 20 cm de diámetro en punta fina, pudrición no mayor a un tercio en la peor cara, grano recto y no presentar una curvatura excesiva (más de 10 cm en una troza de dos metros) (Martínez Pastur *et al.*, 2000). Los volúmenes individuales de trozas se obtuvieron a partir de los datos de campo, mediante la fórmula de *Smalian*.

### Estimación en pie del volumen aprovechable

Para estimar el volumen de trozas en pie se utilizó el siguiente modelo, que fue desarrollado

previamente para una sola clase de sitio (Martínez Pastur *et al.*, 1997b):

$$VTSC (m^3) = M * I \quad (1)$$

donde "*M*" es una regresión no lineal que aporta el volumen de trozas sin corteza de árboles individuales, e "*I*" es un índice de discriminación (valor 0 o 1) construido en base a clasificaciones empíricas (de 3 o 4 clases), de las que usualmente se miden durante los inventarios forestales. Para construir el índice, en este trabajo se utilizó a la clase social (*CS*) (suprimido, intermedio, codominante y dominante), la fase de desarrollo del árbol (*COF* – crecimiento óptimo final, *ENV* – envejecimiento, *DM* – desmoronamiento), la sanidad externa del árbol (*buena* – para un árbol sin defectos, *regular* – para un árbol con defectos localizados y *mala* – para un árbol con defectos generalizados), la forma del fuste (*buena* – para un fuste recto y *mala* – para fustes retorcidos o bifurcados), la aptitud maderera del árbol (posibilidad de extracción o no de un fuste maderable según sus características externas), el *DAP* en cm y la calidad de sitio del rodal de acuerdo a la clasificación propuesta por Martínez Pastur *et al.* (1997a).

El componente "*M*" representa el volumen de trozas sin corteza (*VTSC*) (m<sup>3</sup>) que aportará un árbol cuyo componente *I* sea igual a 1. El componente "*M*" quedó representado por el siguiente modelo que fue ajustado mediante técnicas de regresión no lineal:

$$VTSC = \frac{a}{10000} x (6 - S)^b x DAP^c \quad (2)$$

donde *a*, *b* y *c* son los parámetros de la ecuación, *DAP* es el diámetro normal a 1,3 m (cm) y *S* representa a la clase de sitio (en números arábigos de 1 a 5).

### Análisis multivariado de las variables del modelo

Con los datos de los árboles individuales utilizados para ajustar el modelo (*M*) y desarrollar el discriminante (*I*) se llevó a cabo un análisis de componentes principales (*PCA*). Se

utilizó una matriz de correlación entre las variables del inventario, para constatar la importancia de las mismas en la probable explicación de la variable estudiada a partir de la variación interna de los datos. Posteriormente, en un gráfico de ordenamiento se clasificaron los individuos en árboles que no produjeron trozas, que tuvieron una baja producción de trozas (rendimiento individual menor al 50% de volumen de trozas respecto del volumen total) e individuos con alta producción de trozas (rendimiento individual mayor o igual al 50% de volumen de trozas respecto del volumen total).

### Estimación del rendimiento de trozas en el aserrado

Para realizar las estimaciones se seleccionaron trozas de las canchas de acopio con diferentes diámetros, largos, presencia de curvatura y porcentajes de pudrición. Las mismas se procesaron en las instalaciones del aserradero 'Los Cóndores' en una línea continua compuesta de una sierra principal *Primultini*, una reaserradora *Primultini* y una despuntadora de sierra circular *Denning*. El aserrado de las trozas se realizó priorizando la obtención de tablas de exportación (una cara sin defectos y 36 mm de espesor) y madera larga (más de 6 pies de largo) para el mercado interno. Las tablas para exportación se procesaron para maximizar la obtención de listones de 75,0 mm de ancho, 25,4 mm de espesor y un largo de 0,5 a 2,1 m. El producto de cada troza se mantuvo individualizado. Posteriormente se ajustó una regresión no-lineal a partir de parámetros de fácil medición en las trozas y utilizados para la selección de las mismas.

### Estadísticos y validación de los modelos

Se llevó a cabo un análisis de varianza mediante la prueba de F, con los datos de estructura

forestal utilizando a la calidad de sitio como factor principal. Las medias fueron separadas mediante el test de Tukey a una  $P < 0,05$ . La evaluación estadística de los modelos se llevó a cabo a través del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la significancia de los coeficientes de la ecuación, la relación error / modelo ( $R$ ), la desviación residual estándar ( $DRE$ ) y el residual promedio. Para evaluar el comportamiento del modelo desarrollado (componente  $I$ ) frente a la muestra, se llevó a cabo una prueba de *Chi-cuadrado* entre las frecuencias observadas y las modeladas, para clases de calidad de sitio y diámetro. Finalmente, con los modelos ajustados se llevó a cabo una autovalidación utilizando la misma base de datos, realizando un análisis de los errores porcentuales promedio ( $\bar{e}$ ) a través de rangos de frecuencia de diámetros y calidades de sitio. Este último estadístico se expresa de la siguiente forma:

$$\bar{e} = ((\sum_{i=1}^n e_i) / n)$$

donde  $n$  es el número de datos utilizados en el ajuste del modelo y  $e_i$  el residuo (valor observado – valor predicho).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de los rodales y de la muestra para árboles en pie

La estructura forestal de los rodales a lo largo del gradiente de clases de sitio presentó diferencias significativas en todas las variables estudiadas (Cuadro N° 1), con excepción del área basal, debido a que los mismos se seleccionaron cuando poseían una densidad completa. Estas diferencias indican que es imposible intentar realizar un estudio de este estilo sin considerar a la calidad de sitio como una de las variables predictoras.

**Cuadro 1.** Análisis de la varianza de la estructura forestal de los rodales muestreados a lo largo del gradiente de calidad de sitio

Clase de Sitio	N (arb/ha)	DCM (cm)	AB (m <sup>2</sup> /ha)	AP (m)	AD (m)	VTCC (m <sup>3</sup> /ha)
I	382,5a	46,8c	76,6a	23,5c	27,5e	1098,7c
II	332,0a	44,9c	61,0a	22,1c	25,4d	815,0bc
III	746,6b	32,9ab	81,5a	17,1b	21,5c	897,9bc
IV	433,3a	40,2bc	60,8a	14,9b	17,4b	536,4ab
V	1026,6c	25,6a	65,9a	10,4a	13,7a	397,6a

*N* = número de árboles; *DCM* = diámetro cuadrático medio; *AB* = área basal; *AP* = altura promedio de los árboles; *AD* = altura dominante de los árboles; *VTCC* = volumen total con corteza de los árboles. Valores de la prueba de F = *N* (29,8); *DCM* (22,0); *AB* (2,5); *AP* (112,9); *AD* (378,4); *VTCC* (9,8). Letras diferentes indican diferencias significativas a  $P < 0,05$ . Las clases de sitio fueron definidas de acuerdo a Martínez Pastur et al. (1997a).

El cambio en la estructura forestal que se observó en el gradiente de calidades de sitio estudiado afectó directamente la producción de trozas del rodal. En sitios de alta calidad (*I* y *II*) el diámetro y la altura promedio son significativamente mayores que un sitio de calidad media (*III*), y este a su vez significativamente mayor que un sitio de calidad mala (*V*). Estas variables afectaron directamente al volumen total del rodal, que está íntimamente relacionado con el volumen de extracción potencial.

La muestra utilizada para la construcción de los modelos de volumen aprovechable en pie quedó definida por la producción de trozas de 771 árboles a lo largo de las cinco calidades de sitio (Cuadro N° 2). En la muestra puede observarse un gradiente en la distribución diamétrica de los árboles aprovechados, la cual disminuye a medida que la calidad de sitio empeora. Estos gradientes no son deseables al diseñar un muestreo. Sin embargo, la muestra presenta una distribución normal dentro de cada calidad de sitio por lo que se consideró como adecuada y representativa para la zona bajo estudio.

**Cuadro 2.** Distribución de los árboles muestra según clases diamétricas a lo largo de un gradiente de calidad de sitio. Entre paréntesis figuran los árboles maderables.

DAP (cm)	Calidad de Sitio					Total
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	
< 20	14 (0)	24 (0)	94 (0)	19 (0)	148 (0)	299 (0)
20-40	65 (59)	63 (58)	67 (59)	52 (41)	78 (28)	325 (245)
40-60	36 (35)	36 (35)	18 (11)	18 (11)	14 (0)	122 (92)
60-80	8 (5)	5 (1)	8 (4)	1 (1)	---	22 (11)
> 80	2 (1)	---	1 (0)	---	---	3 (1)
Total	125 (100)	128 (94)	188 (74)	90 (53)	240 (28)	771 (349)

Las clases de sitio fueron definidas de acuerdo a Martínez Pastur *et al.* (1997a).

Cabe destacar la escasa presencia de árboles de diámetros importantes (> 80 cm DAP). Esto es debido a que en general dichos árboles son marcados como semilleros durante la realización del tratamiento de cortas de protección. Por lo que el modelo desarrollado en este trabajo tiene aplicación limitada a los individuos aprovechados en la corta inicial o de regeneración de un sistema de cortas de protección, y no se aplica a los extraídos en una corta final.

#### Estimación en pie del volumen aprovechable

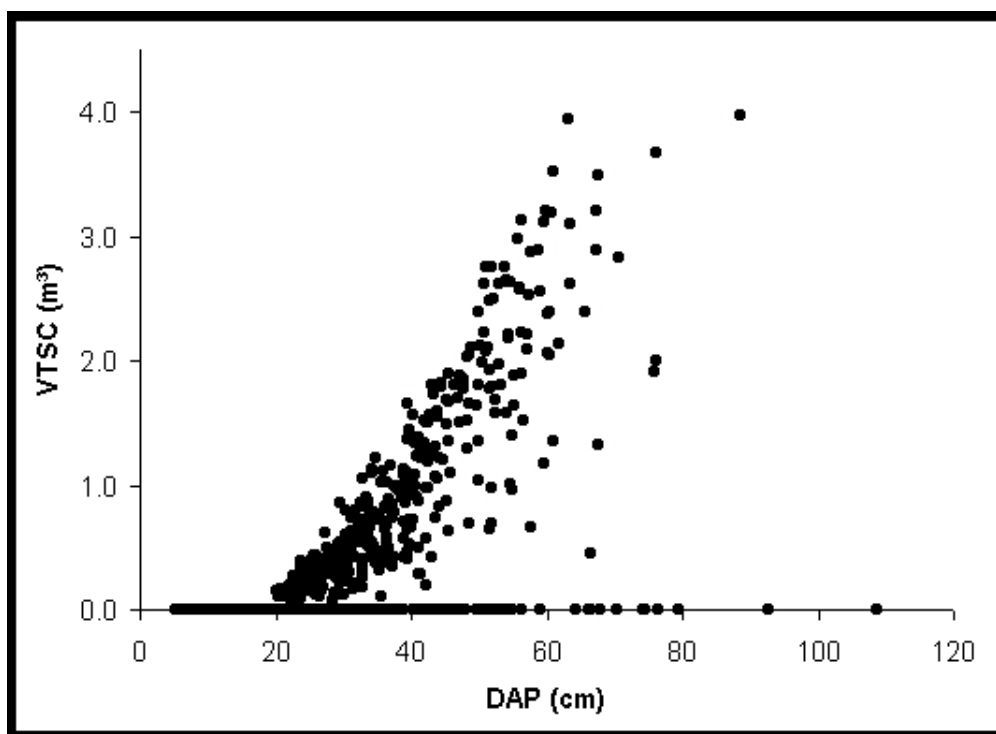
Los valores observados  $VTSC - DAP$  presentan una distribución heterogénea y dispersa (Figura N° 1), y es lógico pensar que dicha dispersión se debe principalmente a la calidad de sitio ya que para un mismo  $DAP$ , el  $VTSC$  sería mayor en calidades de sitio mejores. Por otra parte, la

modelización de este tipo de variables se complica debido a la presencia de valores nulos ( $VTSC = 0$ ) a lo largo de todo el gradiente diamétrico. Este es el motivo por el cual se propuso el modelo (1) en el cual se aplica un discriminante (componente  $I$  de la ecuación) que separa del total de los árboles aprovechados a aquellos que aportan volumen de trozas ( $I = 1$ ) de los que no aportan volumen de trozas ( $I = 0$ ). De este modo quedó definido la clave de discriminantes del Cuadro N° 3, ajustada para la muestra que se presentó en el Cuadro N° 2. La construcción del componente  $I$  se llevó a cabo analizando las probabilidades de encontrar individuos que aportaran o no trozas. Por otra parte, en caso de que los mismos aportaran trozas, se analizó en qué magnitud lo hacían, evaluando el rendimiento individual (relación entre el volumen de trozas y el volumen total del árbol).

**Cuadro 3.** Componente “I” del modelo(1) de estimación del volumen aprovechable en pie.

Sitio	DAP (cm)	CS	Fuste	Fase	Sanidad	Forma	I							
I - II	>20						<20							
							0							
							DOM	SI	COF - ENV		1			
									DM	BUENA - REGULAR	1			
							DOM	NO	COF - ENV		1			
									DM		0			
							COD	SI - NO	COF - ENV		1			
									DM		0			
							INT	SI	COF - ENV		1			
									DM		0			
							INT	NO	COF - ENV		1			
									DM		0			
							SUP	SI	COF - DM		0			
									ENV		1			
							SUP	NO	COF - ENV	BUENA - REGULAR	BUENA	1		
	MALA	MALA	0											
		DM		0										
III	>20						<20							
							0							
							DOM	SI			1			
									NO		0			
							COD	SI			1			
									NO	COF - DM		0		
							COD	NO		ENV	1			
											0			
							INT	SI			1			
										COF		1		
							INT	NO		ENV	BUENA - REGULAR	BUENA	1	
											MALA	MALA	0	
									DM		0			
							SUP	SI			1			
									NO		0			
IV	>20						<20							
							0							
							DOM	SI			1			
									NO		0			
							COD	SI - NO	COF - ENV		1			
									DM		0			
							INT	SI			1			
									NO	COF - DM		0		
							INT	NO		ENV	1			
											0			
							SUP	SI			1			
									NO		0			
							V	20-45						<20
														0
														DOM
DM		0												
DOM	NO			0										
				0										
COD	SI	COF - ENV		1										
		DM		0										
COD	NO	COF - ENV	BUENA - REGULAR	BUENA	1									
			MALA	MALA	0									
		DM		0										
INT	SI - NO	COF		1										
		ENV - DM		0										
SUP				0										
				0										
				0										
	>45			0										

Sitio = calidad de sitio; CS = posición sociológica; Fuste = aptitud maderera del árbol; Fase = fase de desarrollo.



**Figura 1.** Distribución de los valores observados en la muestra. *DAP* = diámetro a la altura del pecho; *VTSC* = volumen de trozas sin corteza.

Para evaluar la calidad del discriminante, se analizaron las frecuencias de individuos que podrían aportar trozas y que no podrían aportar trozas. El discriminante resultó adecuado, ya que no se observaron diferencias significativas al efectuar una prueba de *Chi-cuadrado* entre las frecuencias observadas y las modeladas (Cuadro N° 4). Los porcentajes presentados se obtuvieron a partir del número de individuos de cada clase analizada que produce o no trozas,

comparando los resultados del discriminante *I* y los datos originales. La potencialidad del modelo no radica en una acertada predicción individual de producción de trozas, sino en la adecuada predicción de frecuencias de acuerdo a gradientes diamétricos y de calidad de sitio. El modelo propuesto debe ser utilizado para obtener rendimientos a nivel de rodal, a partir de variables de árboles individuales obtenidas en las parcelas de inventario.

**Cuadro 4.** Análisis de *Chi-cuadrado* para el discriminante "*I*" de la ecuación (1) del modelo de estimación del volumen aprovechable en pie.

	Sitio	N	VVSC = 0		Chi-cuadrado	Significancia
			Real	Estimado		
Sitio	I-II	253	21,3%	17,8%	1,0172	0,400
	III	188	53,2%	52,7%	0,0107	0,922
	IV	90	38,9%	38,9%	---	1,000
	V	240	85,8%	84,6%	0,1488	0,779
DAP (cm)	< 20	442	100,0%	100,0%	---	1,000
	20-40	347	35,2%	29,7%	2,3742	0,159
	40-60	166	22,3%	24,7%	0,2681	0,670
	> 60	37	40,5%	45,9%	0,2202	0,714
<b>Total</b>		<b>771</b>	<b>51,2%</b>	<b>49,5%</b>	<b>0,4384</b>	<b>0,515</b>

Las clases de sitio fueron definidas de acuerdo a Martínez Pastur *et al.* (1997a).

El componente *M* del modelo (1) representado por la ecuación (2) quedó definido por los parámetros y estadísticos que se presentan en la Cuadro N° 5. Los parámetros del modelo fueron significativos a  $P < 0,01$ , con un bajo residual promedio (-0,02 m³) considerando los valores a predecir de VTSC. Por otra parte,

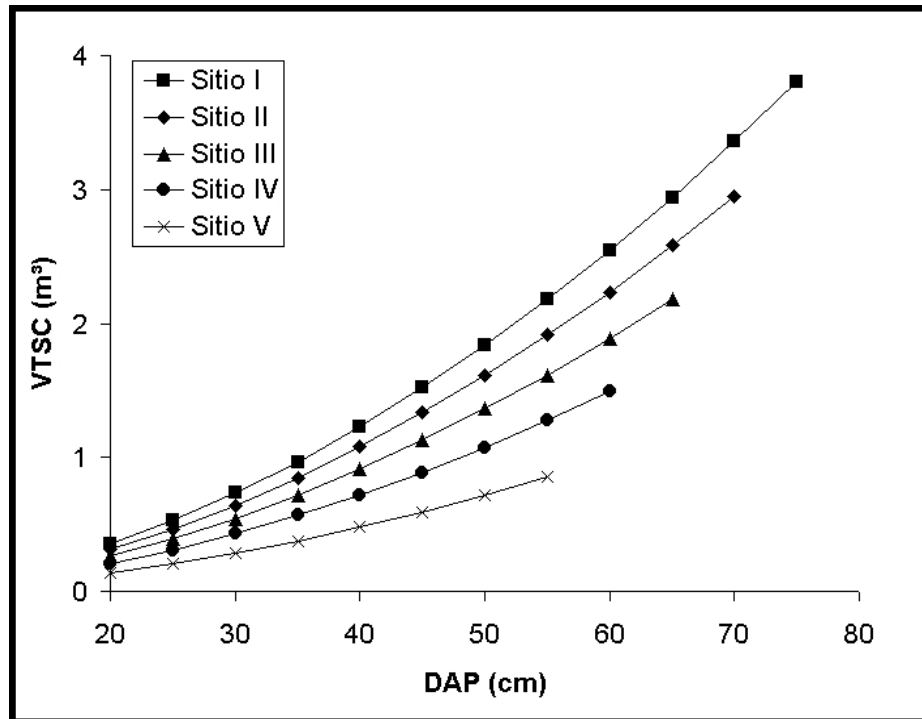
podemos considerar como adecuado un  $r^2$  de 0,79, considerando que la variable dependiente presenta un comportamiento muchas veces errático y de difícil explicación. Sin embargo, al eliminar de la muestra aquellos individuos que no producían trozas, fue posible modelar una ecuación que tuviera un ajuste adecuado.

**Cuadro 5.** Componente “*M*” del modelo (1) de estimación del volumen aprovechable en pie.

Parámetros		Estadísticos	
a	6,32744755	r-cuadrado	0,794
b	0,58438789	Relación	1392,17
c	1,79753582	Residual promedio	-0,02404
		DRE	0,372944

Si bien la dispersión de los datos observados fue grande (Figura N° 1), la inclusión del *DAP* y de la calidad de sitio como variables independientes fueron suficientes para explicar el 80% de la variación encontrada en los datos. Los errores del modelo se encontraron muy por debajo de lo utilizado o exigido usualmente en Planes de Manejo Forestal (15% para Tierra del Fuego - Argentina). Por otra parte, el modelo presentó un buen comportamiento biológico, ya que representó lo que se esperaba que ocurriera en la realidad (Figura N° 2). La dispersión de los

datos para una misma clase diamétrica (Figura N° 1) puede fácilmente explicarse a partir de las diferentes calidades de sitio. Por ejemplo, un árbol aprovechable de 50 cm de *DAP* correspondiente a un sitio I genera 156% más volumen de trozas que un árbol del mismo diámetro desarrollándose en una clase de sitio V. Por otra parte, al comparar ambas figuras puede verse que tanto los datos como el modelo siguen una misma tendencia.



**Figura 2.** Componente “*M*” del modelo (1) de estimación del volumen aprovechable en pie. *DAP* = diámetro a la altura del pecho; *VTSC* = volumen de trozas sin corteza.



También se evaluó el ajuste y comportamiento del modelo (1) completo ( $M * I$ ) mediante un análisis de sus errores porcentuales. Los resultados de la autovalidación se presentan en la Cuadro N° 6. El error total de la estimación fue de 2,2%, con valores que variaron entre un 0,8% (para una calidad de sitio V) y un 6,0% (para una calidad de sitio III). Los resultados fueron similares a los obtenidos previamente (Martínez Pastur *et al.*, 1997), y menores a los observados por Chauchard y Carabelli (1992) (9%) para 12 árboles. Los errores discriminados por clases diamétricas y calidad de sitio presentaron un comportamiento muy variable,

encontrándose íntimamente relacionado a la frecuencia relativa de cada clase. Son destacables algunos valores de errores relativos, principalmente de clases diamétricas altas (> 60%) (Cuadro N° 6). Esto se debe a que el ingreso de un árbol de esas dimensiones, que no producía trozas según el modelo pero que sí las producía en la muestra, produjo un impacto muy grande dentro del análisis. Esto mismo fue citado por Martínez Pastur *et al.* (1997) donde el volumen de un solo individuo originó gran parte del error total del modelo.

**Cuadro 6.** Valores reales y modelados mediante la ecuación (1) y errores obtenidos en la estimación a lo largo de un gradiente de diámetro y clases de sitio.

		<b>VVSC (m<sup>3</sup>/ha)</b>		
		<b>Real</b>	<b>Modelo</b>	<b>Error</b>
<b>TOTAL</b>		252,8	258,4	<b>2,2%</b>
SITIO I-II		920,2	930,4	<b>1,1%</b>
DAP (cm)	20-40	617,8	594,8	<b>-3,7%</b>
	40-60	268,8	282,7	<b>5,2%</b>
	60-80	26,2	44,4	<b>69,4%</b>
	>80	7,4	8,6	<b>15,6%</b>
SITIO III		196,1	207,8	<b>6,0%</b>
DAP (cm)	20-40	106,3	131,7	<b>23,9%</b>
	40-60	45,5	41,3	<b>-9,2%</b>
	>60	44,3	34,8	<b>-21,5%</b>
SITIO IV		117,6	123,5	<b>5,0%</b>
DAP (cm)	20-40	95,9	101,2	<b>5,5%</b>
	40-60	21,2	20,5	<b>-3,3%</b>
	>60	0,5	1,8	<b>245,6%</b>
SITIO V		30,3	30,5	<b>0,8%</b>
DAP (cm)	20-40	30,3	30,5	<b>0,8%</b>
	>40	0,0	0,0	<b>0,0%</b>

Las clases de sitio fueron definidas de acuerdo a Martínez Pastur *et al.* (1997a).

### **Análisis de componentes principales de las variables del modelo**

A través de este análisis se demostró la importancia de cada una de variables incluidas para el ajuste del modelo ( $M$ ) y del desarrollo del discriminante ( $I$ ). El primer eje explicó el 42% de la varianza que presentaron los datos, con un autovalor de 2,92. A través de los coeficientes de las variables que integran este eje podemos analizar su peso relativo en cada eje (Cuadro N° 7). En el primer eje, se puede observar que

todas las variables poseen similar peso relativo, con excepción de la sanidad. Los coeficientes del DAP, la aptitud maderera y la fase de desarrollo del árbol tuvieron un gran peso positivo, mientras que la clase de copa, la calidad de sitio y la forma presentaron coeficientes negativos de menor magnitud. La inclusión del segundo eje permite explicar otro 22% de la varianza, siendo su autovalor de 1,56. En este eje, la sanidad fue la variable con mayor peso negativo, junto con la fase de desarrollo y la forma del fuste que le siguieron en

importancia. El resto de las variables tuvo un peso menor y similar entre sí. Con respecto a los otros ejes generados en el análisis, se consideró que el aporte individual de los mismos en la explicación de la varianza no fue significativo, ya que solo con los dos primeros se explicó el 64% de la misma. A través de este

análisis pudo observarse que todas las variables incluidas en el modelo fueron importantes para la predicción del volumen de trozas, siempre que las mismas sean introducidas como parte de una clasificación simple de 3 o 4 componentes.

**Cuadro 7.** Análisis de componentes principales de las variables utilizadas para ajustar el modelo (1): autovalores, porcentaje de varianza explicada y coeficiente de los ejes.

Eje	Autovalor	% de Varianza	% de Varianza acumulado		
1	2,923	41,8	41,8		
2	1,557	22,2	64,0		
3	0,866	12,4	76,4		
4	0,670	9,6	85,9		
5	0,423	6,0	92,0		
6	0,383	5,5	97,5		
7	0,178	2,5	100,0		

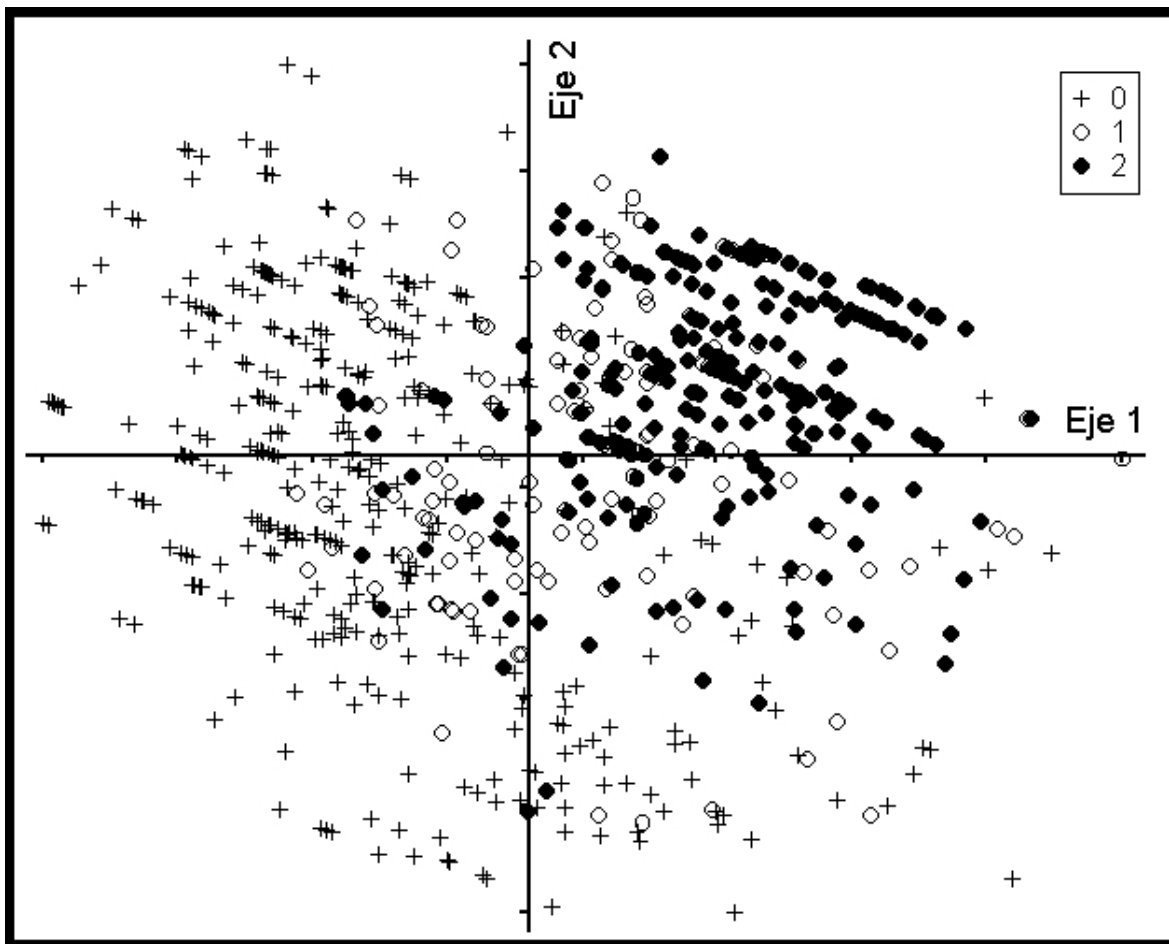
  

Variable	Eje				
	1	2	3	4	5
sitio	-0,3188	-0,2197	-0,8036	-0,1256	0,2691
DAP	0,5161	-0,2282	0,0263	0,1081	-0,1906
clase	-0,4418	0,1014	0,5084	-0,2314	0,5237
fuste	0,4539	0,2642	0,0364	0,1115	0,4301
fase	0,3646	-0,4907	-0,0023	-0,0343	0,6069
sanidad	-0,0571	-0,6653	0,268	-0,4318	-0,2477
forma	-0,3076	-0,3691	0,1479	0,8479	0,0489

sitio = calidad de sitio; clase = posición sociológica; fuste = aptitud maderera del árbol; fase = fase de desarrollo.

En el gráfico de ordenamiento (Figura N° 3) se observó una buena separación de los individuos que no produjeron trozas, de aquellos con baja producción y de alta producción. Esta separación se realizó considerando a todas las variables que fueron incluidas en el modelo. El eje 1 separó un gran porcentaje de los árboles sin producción de trozas de aquellos con alta producción, quedando los de baja producción en un estrato intermedio, a través de un gradiente que va de izquierda a derecha. El eje 2 produjo una menor dispersión que el primer eje, pero separó los árboles sin producción de los que

poseían producción de trozas en el sector derecho del gráfico, a través de un gradiente que va desde abajo hacia arriba. Como se explicó anteriormente en base a los valores de cada componente, el eje 1 se asoció al tamaño de los árboles para describir su rendimiento ubicándose en un extremo los de DAP pequeño, clases de copa inferiores y fases de desarrollo tempranas; y en el otro, los de DAP grande, clases de copa superiores y fases de desarrollo avanzadas. El eje 2 separó principalmente por el estado sanitario de los individuos.



**Figura 3.** Gráfico de ordenamiento del análisis de componentes principales (eje 1 y 2) donde se observan los individuos de acuerdo a la producción de trozas individual: (0) sin producción de trozas, (1) baja producción de trozas (rendimiento individual menor al 50% de volumen de trozas respecto del volumen total) y (2) alta producción de trozas (rendimiento individual mayor o igual al 50% de volumen de trozas respecto del volumen total).

### Utilización del modelo en la práctica

Las variables que se incorporaron en la construcción de este modelo fueron seleccionadas por ser las que usualmente se utilizaban en los inventarios de Patagonia Sur (Argentina) como la forma, la sanidad y la aptitud maderera; o que fueron propuestas para describir la estructura forestal de los bosques de lenga en general (Schmidt y Urzúa, 1982). Esta metodología puede incorporar otros tipos de datos que se adapten a otras especies, o que reflejen de mejor manera la obtención de un producto para una industria forestal determinada.

Los datos necesarios deben tomarse a nivel de rodal (como la calidad de sitio) o individual (DAP, fase de desarrollo, clase social, etc...) durante la realización del inventario forestal, ya sea en parcelas de superficie fija, transectas, o en muestreos por punto. Hay que tener en cuenta que antes de aplicar el modelo, debemos haber simulado la corta de protección, o haber hecho los muestreos luego de la marcación de los individuos remanentes. Luego, debe aplicarse el componente  $I$  a cada individuo de una misma parcela, para determinar el valor del discriminante (0 o 1), y posteriormente, multiplicarlo por el valor de componente  $M$ , para obtener el volumen de trozas que aportaría

dicho individuo. La suma de los productos de los individuos nos dará el volumen de trozas que aportará por hectárea dicha parcela. Este procedimiento es fácil de realizar en planillas de cálculo mediante el uso de fórmulas lógicas.

**Estimación del rendimiento de trozas en el aserradero**

Dentro de las trozas obtenidas durante el aprovechamiento del ensayo anterior, se procedió a seleccionar una muestra. La misma fue discriminada de acuerdo a las clases

diamétricas, de longitud y presencia de pudrición de acuerdo a lo presentado en la Cuadro N° 8. La muestra no tuvo una distribución normal, quedando definida de acuerdo al producto que llega al aserradero, siendo representativa del material que se procesa en el monte durante el trozado y rastreo. La razón de la falta de normalidad de la muestra, fue que la misma fue seleccionada no solo por las clases diamétricas y de longitud, sino también por la presencia de curvatura, que es más frecuente en las clases diamétricas inferiores.

**Cuadro 8.** Muestra de las trozas seleccionadas para la construcción de la función de rendimiento en el aserradero.

Diámetro (cm)	Presencia de pudrición	Largo (m)			Total
		3,1 - 4,0	4,1 - 5,0	5,1 - 6,0	
20,1 – 30,0	Sí	1	0	0	1
	No	4	7	0	11
30,1 – 40,0	Sí	1	2	3	6
	No	1	3	0	4
40,1 – 60,0	Sí	0	0	1	1
	No	1	2	0	3
<b>Total</b>		8	14	4	<b>26</b>

A partir de los rendimientos obtenidos de las trozas y las variables medidas en cada una de ellas (diámetro promedio, largo, presencia de flecha, pudrición promedio de ambas caras y pudrición de la peor cara) se realizó una regresión paso a paso, siendo el diámetro promedio y el largo las únicas variables que explicaron significativamente el rendimiento del

aserrado. Con dichas variables se ajustó un modelo no lineal que se presenta en la Cuadro N° 9 junto a sus parámetros y estadísticos. Los parámetros del modelo fueron significativos a  $P < 0,01$ , con un bajo residual promedio (-0,006 m³) considerando los valores promedios de trozas (0,35 m³). Por otra parte, se obtuvo un alto  $r^2$  de 0,90.

**Cuadro 9.** Modelo de rendimiento de trozas en el aserradero.

<i>Modelo</i>			
$VM = a \times D^b \times L^c$			
donde $VM$ = volumen de madera procesada (m³).			
$D$ = diámetro promedio de la troza (cm).			
$L$ = longitud de la troza (m).			
Parámetros	Estadísticos		
a	0,00004804	r-cuadrado	0,907601
b	1,90758730	Relación	324,7601
c	1,06841818	Residual promedio	0,006842
		DRE	0,080932

El modelo se validó utilizando las trozas correspondientes a una jornada laboral ( $n = 120$ ), obteniéndose un volumen de madera aserrada de  $38,4 \text{ m}^3$ . Dicho volumen representó un rendimiento del 47,8%. Este rendimiento potencial se correspondió con los promedios de los registros de la empresa para el mes laboral en que se realizaron los ensayos, que estuvo cercano al 45%.

## CONCLUSIONES

El modelo de estimación de volúmenes aprovechables en pie es una útil herramienta de uso sencillo, con parámetros de fácil y usual obtención durante los inventarios forestales en *N. pumilio*, y cuya metodología puede ser aplicable a otras especies de boques nativos de Argentina y Chile. Este modelo fue ajustado para todo el rango de calidades de sitio, adaptándose a las características propias de cada uno de ellos. Sin embargo, este modelo fue desarrollado para la obtención de un producto específico de una empresa en particular, y para un método de regeneración determinado (*cortas de protección*). Estas consideraciones deben de tenerse en cuenta a la hora de utilizar modelos previamente desarrollados, o al momento de tomar la decisión de construir uno en particular. La metodología planteada es sencilla, permitiendo un fácil desarrollo de los modelos de acuerdo al tipo de materia prima y de industria que utilice estas herramientas biométricas.

El modelo de rendimiento del aserradero permite estimar la producción de madera aserrada a obtener luego del procesamiento de las trozas. Las variables que necesita el modelo se miden usualmente cuando se fiscaliza el aprovechamiento forestal, y que posteriormente podrían utilizarse para estimar la producción del establecimiento. Sin embargo, la muestra con la que se ajustó este modelo fue muy pequeña (razón que podría explicar la falta de significancia de la pudrición y la flecha), debiéndose incluir en una futura construcción, rangos más extremos de las variables independientes. Este modelo permite predecir cambios en el rendimiento del aserradero cuando el mismo procesa trozas provenientes de diferentes rodales, pudiendo ser una excelente herramienta para estudios de rentabilidad potencial.

Estos modelos son ejemplos de herramientas, que deberían desarrollarse frecuentemente en nuestro ámbito laboral, y que brindan parte de la información necesaria para una mejor planificación en el aprovechamiento del recurso forestal. Por otra parte, estas herramientas intentan brindar resultados más fiables y menos subjetivos para ser utilizados en planes de manejo forestal por las empresas del sector.

## AGRADECIMIENTOS

Al aserradero 'Los Cóndores', al Centro Austral de Investigaciones Científicas, al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y a la Universidad Nacional de la Patagonia Austral por el apoyo financiero e institucional para la realización de este trabajo. A Esteban Moresco y Esteban Solé, quienes participaron en los trabajos de campo.

## BIBLIOGRAFIA

- Cellini, J.M., Spagarino, C., Martínez Pastur, G., Peri, P. y Vukasovic, R. 1998. Rendimiento de distintos sistemas de aprovechamiento en la corta de protección de un bosque de lenga. Actas Primer Congreso Latinoamericano de IUFRO. Valdivia (Chile), 22-28 Noviembre. 10 pp.
- Chauchard, L. y Carabelli, F. 1992. Sistema de clasificación de árboles en pie para la estimación de volúmenes útiles. Actas Seminario de Manejo Forestal de la lenga y aspectos ecológicos asociados. Esquel, 23-24 Junio. CIEFAP - Publicación técnica n° 8: 160-164.
- Chauchard, L. y González Peñalba, M. 1993. Sistema de clasificación de árboles en pie para la estimación de volúmenes aserrables. Primera convalidación. Actas VII Jornadas Técnicas. Ecosistemas forestales nativos: uso, manejo y conservación. Eldorado, 10-12 Noviembre. ISIF - Universidad de Misiones. Pp 225-234.
- Donoso, S. y Caldentey, J. 1996. Rendimiento de lenga (*Nothofagus pumilio*) en el aserrado y su relación con las características de los árboles. Ciencias Forestales 11(1-2): 19-30.

- Fernández, C., Martínez Pastur, G., Peri, P. y Vukasovic, R. 1997. Thinning schedules for *Nothofagus pumilio* forest in Patagonia, Argentina. Actas XI Congreso Forestal Mundial. Volumen 3: D. Función productiva de los bosques. Antalya (Turquía) 13-22 Octubre.
- Martínez Pastur, G., Fernández, C., Peri, P. y Boyeras, F. 1993. Ecuaciones estándar de volumen total para la lenga (*Nothofagus pumilio*) de la margen sur del lago General Vintter y Cerro Colorado, (Provincia del Chubut), Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía 69(1): 5-12.
- Martínez Pastur, G., Peri, P., Vukasovic, R., Vaccaro, S. y Piriz Carrillo, V. 1997a. Site index equation for *Nothofagus pumilio* forests. Phytion 6(1/2): 55-60.
- Martínez Pastur, G., Peri, P., Vukasovic, R., Cellini, J. M., Spagarino, C. y Sharpe, D. 1997b. Funciones de rendimiento volumétrico para un bosque de *Nothofagus pumilio* de calidad III y un aserradero mediano en Tierra del Fuego. Actas II Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Pp 123-132. Posadas, 13-15 Agosto.
- Martínez Pastur, G., Cellini, J. M., Peri, P., Vukasovic, R. y Fernández, C. 2000. Timber production of *Nothofagus pumilio* forests by a shelterwood system in Tierra del Fuego (Argentina). Journal of Forest Ecology and Management 134(1-3): 153-162.
- Peri, P., Martínez Pastur, G., Diaz, B. y Fucaraccio, F. 1997. Uso del índice de sitio para la construcción de ecuaciones estándar de volumen total de fuste para lenga (*Nothofagus pumilio*) en Patagonia Austral. Actas II Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Pp 309-316. Posadas, 13-15 Agosto.
- Piterbarg, R. 1965. Inventario y ordenación de un bosque de lenga (*Nothofagus pumilio*) en Tierra del Fuego, y primeros resultados de su explotación. Revista Forestal Argentina IX(4): 105-113.
- Schmidt, H. y Urzúa, A. 1982. Transformación y Manejo de los Bosques de lenga en Magallanes. Universidad de Chile. Ciencias Agrícolas n° 11. 62 pp.