

MODELO DE ESTIMACIÓN DE VOLUMEN DE MADERA ASERRADA QUE EMPLEA VARIABLES DE ÁRBOLES EN PIE PARA *PINUS RADIATA* D. DON

I. Aranzeta Zamora ¹, M. Casado Sanz ¹ y V. Pando Fernández ²

¹ Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Avda. Madrid 57. 34004–PALENCIA (España). Correo electrónico: iaranzeta@yahoo.es

² Departamento de Estadística e Investigación operativa. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Avda. Madrid 57. 34004–PALENCIA (España)

Resumen

Se presenta y valida un modelo de cálculo de volumen aserrado para *Pinus radiata* D. Don, que utiliza las dos variables tradicionalmente empleadas en los inventarios forestales (diámetro normal y altura) y que se pueden medir sobre los árboles en pie. Para elaborar y validar este modelo, se han utilizado 662 árboles apeados y 362 trozas aserradas. Será aplicable tanto al aserradero en el que se han recogido los datos de aprovechamiento, como a aquellos que empleen los mismos procesos de producción que éste y en los que el destino de los productos elaborados sea el mueble. El modelo propuesto es una nueva herramienta que mejorará la calidad de las cubicaciones de madera en pie de *Pinus radiata*, realizadas hoy en día sobre la casi totalidad de rodales explotados en la Cornisa Cantábrica. La mejora se fundamenta en dos aspectos: a) Se optimiza la estimación del perfil de tronco, con el uso de un conjunto de funciones que sustituyen a la función única de perfil de tronco empleada habitualmente. b) Se crea un sistema de transformación del volumen en rollo a volumen aserrado, inexistente hasta el momento, y que evita que esta conversión se haga subjetivamente por el serrero.

Palabras clave: *Pinus radiata*, Madera aserrada, Cornisa Cantábrica, Perfil de tronco

INTRODUCCIÓN

La necesidad de conocer las existencias de madera en pie de una determinada unidad dasocrática es un problema ampliamente estudiado desde muy antiguo. Así, se han creado y desarrollado diversos instrumentos que permiten una planificación forestal cada vez a más largo plazo, sobre un mayor número de aspectos y con menores niveles de incertidumbre. Por tanto, si bien es cierto que la planificación forestal goza de unas herramientas cada vez más eficaces, no ocurre igual con ciertas necesidades de la industria forestal. Este es el caso

de las cubicaciones sobre madera en pie de *Pinus radiata* D. Don.

Para adquirir la madera en pie, los aserraderos necesitan conocer con la mayor precisión posible, el volumen y la calidad de los productos que se obtendrán tras el aserrado. Esta precisión resulta ser una pieza muy importante para que la empresa mantenga un buen nivel de competitividad.

Para conocer el volumen y la calidad de los productos que alberga el rodal en pie, se hace necesario crear una cadena de conversión o modelo matemático que transforme las variables diámetro normal (Dn) y altura a 20 cm en punta

delgada (Alt20), medidas sobre los árboles en pie. De esta cadena, en la actualidad se dispone de alguno de sus elementos como son las funciones de perfil y las de distribución del espesor de corteza. Sin embargo, se hace necesario la creación de nuevos instrumentos que informen de forma fiable sobre el tipo de tronzado y la asignación del destino de las trozas, así como del proceso de aserrado.

Las características y destino de las trozas obtenidas en la explotación debe predecirse no sólo en función de sus dimensiones, como lo hacen las actuales tarifas de cubicación con clasificación de productos, sino que además deben incorporar otros criterios, como el tipo de explotación del monte, que condiciona muchos de los cambios de destino por roturas, o las características de la madera, especialmente en cuanto a su aptitud para madera de mueble.

Asimismo, también se requiere una herramienta que simule con ciertas garantías de seguridad el proceso de aserrado, considerando aspectos específicos de éste que dependen del aserradero, como el flujo de la madera y el destino de los productos.

Por otro lado, la concepción de las funciones de perfil se hace bajo la premisa de aplicabilidad integral. Es decir, dar respuesta dendrométrica a todo el fuste hasta la punta final, y para árboles de casi cualquier edad y dimensión. Sin embargo, la probabilidad de encontrarse árboles de menos de 29 años de edad o 25 cm de diámetro normal; así como la necesidad de predecir diámetros en el fuste menores a 20 cm con destino a sierra, es prácticamente nula en las cortas a hecho realizadas en la actualidad. Por tanto, dada la muestra disponible de datos de árboles apeados, se hace interesante crear otro instrumento de predicción del perfil del tronco más específico que las funciones de perfil, que mejore la calidad de predicción en los tramos bajos y medios del fuste -en el aserradero estudiado el 95% del valor de los productos se concentran por debajo del percentil 60 de la altura total- y cuya única aplicación sean los rodales que hayan alcanzado la edad de turno para madera de sierra.

La cadena de conversión o modelo matemático que presentamos lo integran los siguientes elementos o submodelos: 1.- del perfil del tronco con corteza (subm. uno), 2.- de la distribu-

ción del espesor de la corteza (subm. dos), 3.- de tronzado y asignación de destino de las trozas (subm. tres), 4.- del rendimiento inicial de aserrado (subm. cuatro), 5.- de retestado extraordinario primario (subm. cinco), 6.- de retestado extraordinario secundario (subm. seis).

Dada la especificidad de los elementos 3,4,5, y 6 de la cadena, la aplicación del modelo se verá restringida al aserradero sobre el que se han recogido las muestras (MADERAS BASAÑEZ S.A.), así como a otros que empleen los mismos procesos de producción y destino de los productos aserrados, una vez verificada individualmente esta circunstancia a través de una sencilla muestra.

MATERIAL Y MÉTODOS

Perfil de tronco sin corteza. Submodelos uno y dos.

Se emplearon 662 árboles apeados (572 para el ajuste y 90 para la validación). De éstos, 270 (submuestra A), los proporcionó el Gobierno Vasco, y los 392 restantes se midieron por los autores. Todos los pies de la muestra tenían un diámetro normal superior a 24 cm y edad mayor de 28 años. En la tabla 1 se recogen sus principales variables dendrométricas. Las muestras se seleccionaron aleatoriamente de masas de la Comunidad Autónoma del País Vasco, buscando la mayor diversidad ecológica y selvícola posibles al objeto de tener la máxima variación de alturas-diámetros normales.

Los diámetros en el fuste se midieron en cruz, a distancias entre 1 y 2.5 m y aproximando al milímetro. Los espesores de corteza también fueron medidos con aproximación al milímetro. También se midió el diámetro normal y el diámetro a 4 m de altura (éste sólo en la submuestra B). La altura total y a 20 cm en punta delgada (ésta sólo en la submuestra B), se midieron con cinta métrica aproximando al decímetro.

Se confeccionaron funciones de perfil cuya fiabilidad de predicción fue comparada con la proporcionada por el método alternativo. Esta fiabilidad se fundamentó en el análisis de los estadísticos resultantes de la fase de ajuste y validación. Los estadísticos considerados fueron:

- Sesgo (\tilde{E}),
- Error medio cuadrático (EMC),
- Desviación estándar de los residuos (S),
- Media

Variable	Muestra de ajuste: N= 572 árboles				Muestra de validación: N= 90 árboles			
	Media	Máximo	Mínimo	D.Típ.	Media	Máximo	Mínimo	D.típ.
D (cm)	40.8	71.3	25.1	8.1	44.7	66.6	27.6	7.7
d4.0 (cm)	35.0	63.7	20.7	7.3	38.7	56.7	21.7	7.0
Alt20 (m)	16.6	30.9	3.5	4.9	19.5	28.7	5.6	4.8
H (m)	28.1	41.5	10.9	5.5	29.4	36.0	17.0	3.6
Vol. (dm ³)*	1269	5098	79	715	1879	4208	308	80.4
E.cort.(mm) **	48	110	10	20	-	-	-	-

Tabla 1. Características de los datos dasométricos de ajuste y validación. Volumen hasta 20 cm en punta delgada. ** Espesor doble de la corteza

de los valores absolutos de los residuos ($|(\hat{\epsilon})|$), • Coef. de determinación (R^2).

Se ajustaron los siguientes seis modelos de funciones de perfil:

KOZAK (1969), de tipo polinómico simple; RIEMER *et al.*, (1995), de tipo exponencial; NEWNHAM (1988); FOREST (SAINT-ANDRÉ *et al.*, 1999) y STUD (LEBAN *et al.*, 1999) de exponente variable y THOMAS Y PARRESOL (1991), trigonométrica.

El método alternativo a las funciones de perfil para predecir el perfil del tronco, consiste en la creación de once ecuaciones de regresión lineal, con dos modalidades: una de dos variables independientes (Dn y Alt20) y la otra de tres (Dn, Alt20 y d_4). Estas ecuaciones proporcionan los diámetros a alturas fijas desde 0 a 25 m, a intervalos fijos de 2.5m. La estimación del diámetro entre estos puntos se obtiene por interpolación lineal. Los modelos de ajuste empleados para cada una de las dos modalidades son:

Dos variables independientes

$$d = a * D^f + b * Alt20^g + c$$

Tres variables independientes

$$d = a * D^f + b * Alt20^g + c * d_4^h + e$$

Donde “a”, “b”, “c” y “e” son los coeficientes de regresión y “f”, “g” y “h” representan a números de hasta dos decimales, obtenidos por tanteo al ofrecer los mejores estadísticos de ajuste. “d” representa los diámetros a estimar (d_0 , $d_{2.5}$, $d_{5.0}$, etc) con corteza y en cm. “D” es el diámetro normal también con corteza y en cm. “Alt20” es la altura hasta 20 cm en punta delgada. “ d_4 ” es el diámetro a 4 m de altura.

Para confeccionar la función del espesor de la corteza se empleó el modelo propuesto por

GORDON Y LUNDGREN (1995) para el pino radiata cuya expresión es:

$$d_{ib} = \sqrt{d_{ob}^2 * (a - b * (1 - h/H)) - c * (1 - h/H)^f}$$

Donde “a”, “b”, “c” y “f” son los coeficientes de regresión, d_{ib} es el diámetro sin corteza a la altura h, d_{ob} es el diámetro con corteza a la altura h, H es la altura total.

Procesos de explotación del monte y aserrado de la madera. Submodelos tres, cuatro, cinco y seis

Para crear el submodelo de tronzado y asignación de destinos de las trozas se recogieron 116 árboles (80 de ajuste y 36 de validación). En la tabla 2 se recogen las características de esta muestra. Los rodales fueron seleccionados aleatoriamente de entre los explotados por el aserradero objeto del estudio, procurando incorporar la máxima variabilidad en cuanto a aptitud para aserrío de mueble. Los árboles medidos en el rodal fueron elegidos al azar, y se procuró tomar la máxima variabilidad de alturas-diámetros normales.

Los datos medidos fueron: Dn, Alt20, altura límite (HI) de la madera para mueble, diámetro límite (DI) de la madera para mueble, número de trozas (Nt) para mueble, HI de la madera para aserrío de menor calidad, DI de la madera para aserrío de menor calidad, Nt de madera para aserrío de menor calidad, HI de la madera para celulosa, DI de la madera para celulosa y Nt trozas de la madera para celulosa.

Este submodelo lo integran los siguientes componentes: • Ecuación de estimación de la HI de la madera para mueble, obtenida por regresión lineal con las variables independientes Dn y Alt20. El modelo de ajuste utilizado ha sido el mismo que el del método alternativo a las funciones de perfil, modalidad primera. • Tabla de

Muestra de ajuste y validación: N= 116 árboles				
Variable	Med.	Máx.	Mín.	D.Típ
HI madera mueble (m)	17.07	27.35	8.50	4.17
HI aserrío menor calidad (m)	21.11	29.45	9.12	5.91
HI celulosa (m)	22.78	30.75	17.50	6.51
DI madera mueble (cm)	28.28	41.00	22.00	3.57
DI aserrío menor calidad (cm)	22.75	32.00	17.30	4.01
DI celulosa (cm)	18.99	30.00	13.00	4.37

Tabla 2. Características de los datos de tronzado y asignación de destino

asignación de longitudes de troza para mueble según su posición en el fuste, obtenida de las observaciones de la explotación • Algoritmo de cálculo de los volúmenes de madera para aserrío de menor calidad y de madera para celulosa, basados en los submodelos uno y dos y en los DI medios para aserrío de menor calidad y celulosa mostrados en la tabla 2.

Para crear y validar el submodelo cuatro se midieron 362 trozas (310 de ajuste y 52 de validación) dentro del aserradero estudiado. En la tabla 3 se muestran sus características. Se seleccionaron al azar y buscando la máxima variabilidad de diámetros y longitudes de troza, así como de programas de corte empleados. De cada troza se medían dos diámetros en cruz en cada una de sus testas, aproximando al milímetro; la longitud de troza aproximando al centímetro; la curvatura se calificaba visualmente como nula, leve, moderada y fuerte; y se apuntaba si era la primera troza.

Se ajustó con las variables independientes diámetro menor de troza, longitud de troza y

conicidad. El modelo empleado se muestra a continuación:

$$\text{Log}(\text{rendimiento}) = a * \log(\text{diámetro menor}) + b * \log(\text{conicidad}) + c * \log(\text{longitud}) + f$$

En la última fase del proceso de aserrado se eliminan las gemas que contienen parte de las piezas aserradas. Esta fase se ejecuta en dos etapas y se simula con los submodelos cinco y seis. Para su creación se midieron 133 y 293 piezas respectivamente. No se validaron al no representar más del 3% del volumen generado en el aserrado. En la tabla 5 figuran estos volúmenes de retestados extraordinarios en función del diámetro medio de la troza. Su confección se ha hecho considerando la probabilidad de ser retestada cada pieza, probabilidad que depende fundamentalmente de la anchura de pieza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 4 se muestran los estadísticos considerados en el ajuste y la validación. Se ajustaron

Muestra de ajuste y validación: N ₁ = 362 trozas y N ₂ =2328 piezas								
Variable	Med.	Máx.	Mín.	D.Típ				
Rendimiento (t.p.u)	0.531	0.764	0.215	0.253				
Diámetro medio troza(cm)	32.640	58.000	16.750	15.960				
Longitud troza (m)	4.452	4.650	3.050	0.279				
Anchura pieza (cm)	18.300	40.000	10.000	10.000				
Grosor pieza (cm)	3.780	11.300	2.000	2.000				
Muestra de ajuste R. Extr. prim.: N= 133 trozas					Muestra de ajuste R. Extr. secund.: N= 293 trozas			
Variable	Media	Máximo	Mínimo	D.Típ.	Media	Máximo	Mínimo	D.típ.
Anchura pieza (cm)	16.03	38.0	10.0	5.21	13.18	30	10	4.25
Grosor pieza (cm)	3.29	11.3	2.5	0.81	2.97	5	2	0.66

Tabla 3. Características de los datos del proceso de aserrado

Submodelo del perfil de tronco. Fase de Validación					
	\tilde{E} (cm)	EMC	$ \tilde{E} $	S	R ²
Newnham	3.200	37.67	4.614	5.207	0.625
Forest	3.110	19.89	3.548	3.174	0.802
Stud	1.090	7.46	1.887	2.492	0.926
Método altern. 2 var	0.288	3.33	1.203	1.798	0.967
Método altern. 3 var	0.130	2.41	0.954	1.539	0.976
Submodelo de la distribución del espesor de la corteza. Fase de Validación					
Esp. doble corteza (mm)	2.400	17.390	3.620	4.580	0.716
Submodelo de tronzado y asignación de destino de las trozas. HI de la madera para mueble. Fase de Validación					
HI mueble (m)	0.870	6.950	2.230	2.670	0.685
Submodelo del rendimiento inicial de aserrado. Fase de Validación					
Rendimiento (t.p.c)	0.696	61.308	5.309	4.837	0.100

Tabla 4. Resultados de los estadísticos de regresión

Submodelo del perfil de tronco. Metodología alternativa. Submodelo 1												
Metodología. 2 variables independientes						2ª Metodología. 3 variables independientes						
Var.ind.	a	b	c	f	g	a	b	c	f	g	h	e
d ₀	7.35	-0.18	-115	0.73	1.08	5.99	-7.48	-69.60	1.99	0.75	0.30	1.02E-4
d _{2.5}	0.21	2.52	54.94	1.20	0.88	0.55	-2.22	-16.69	0.97	0.90	0.50	0.94
d _{5.0}	0.06	4.22	71.70	1.35	0.89	-0.04	0.10	49.14	1.15	0.70	1.55	0.33
d _{7.5}	0.01	1.46	93.00	1.50	1.30	0.05	4.46	72.68	1.50	1.00	0.91	0.02
d _{10.0}	4.09E-3	2.94	83.90	1.70	1.20	0.02	14.69	59.12	2.22	1.20	0.76	1.60E-4
d _{12.5}	0.01	5.18	36.30	1.50	1.40	-3.35E-3	123	-167	1.98	1.00	10.37	7.29E-4
d _{15.0}	1.49E-6	4.99	61.80	2.83	1.15	9.91E-3	2.50	76.92	3.01	1.25	1.32	6.22E-7
d _{17.5}	2.43E-8	-3340	2690	3.40	-0.10	2.87E-6	2.15E-2	-4.34E-2	3.60	2.50	0.36	7.51E-9
d _{20.0}	0.04	24.90	-180	1.20	0.85	6.83E-9	158	-444	3.60	3.50	0.46	1.08E-9
d _{22.5}	5.26E-3	6.23E-3	98.90	1.40	3.03	-2.40E-16	0.56	40.10	3.95	6.00	1.80	6.26E-10
d _{25.0}	9.66E-3	4.94E-4	99.40	1.30	3.70	-8.05E-85	1.39E-7	149	2.50	30.00	6.00	5.85E-6
	a		b			c		f		g		
Submodelo 2	0.954		-0.075			-0.170		12.000		-		
Submodelo 3 (HI mueble)	7.702E-6		1.738E2			1.090E2		3.000		-0.200		
Submodelo 4 (Rendimiento)	0.221		-0.636			0.344		-3.912q-				
Posición troza en fuste	1º		2º			3º		4º		5º 6º		
Longitud (m)	4.550		4.520			4.370		4.150		4.050 3.970		
Submodelo de restestado extraordinario primario												
Clase Diamétrica Troza	25		35			45		>50				
Vol.Ret.1º (dm³)	1.218		1.696			2.117		3.221				
Submodelo de restestado extraordinario secundario												
Clase Diamétrica Troza	25		35			45		>50				
Vol.Ret.2º (dm³)	0.730		1.017			1.336		1.938				

Tabla 5. Resultados de los parámetros estimados, longitud media de troza y volúmenes de restados extr.

los seis modelos mostrados en el capítulo anterior y se desecharon tres en esta fase por la baja calidad de los estadísticos. Se comprueba que la alternativa que ha proporcionado mejores resultados ha sido el método alternativo de tres variables, a continuación el de dos variables y por último la función de perfil ajustada por el modelo

Stud, se consideran de calidad claramente inferior los modelos de Newnham y Forest.

La opción más indicada para ser aplicada, es la correspondiente al método alternativo de dos variables, ya que además de unos estadísticos de validación muy satisfactorios, emplea las mismas variables que las medidas en las cubriciones comerciales.

En la tabla 5 figuran los valores de los parámetros estimados en la regresión de los submodelos uno, dos, tres (HI de la madera para mueble) y cuatro, así como los valores del volumen de los dos retestados extraordinarios. También contiene las longitudes de troza media según posición dentro del fuste. Por último, también se recogen los volúmenes asignados a los dos retestados extraordinarios en función del diámetro medio de troza.

CONCLUSIONES

Los resultados satisfactorios de las validaciones realizadas, nos hacen ser optimistas en cuanto a la fiabilidad del modelo creado. No obstante, se hace interesante un seguimiento inicial de éste para verificar su eficacia. A través de esta experiencia por tanto, se ha visto cómo adoptando un enfoque específico de resolución, parece haberse mejorado este complejo problema tecnológico, aunque sin olvidar las limitaciones de aplicabilidad ya comentadas. Esta limitación se podría mitigar con el desarrollo de modelos más complejos que incluyan variables de tipo tecnológico.

Agradecimientos

Nuestro especial agradecimiento a Iñaki Iturbe, gerente de la empresa MADERAS BASAÑEZ, S.A, por su colaboración en este proyecto al hacer posible la consecución de muchos de los trabajos realizados.

BIBLIOGRAFIA

- GORDON, A.D. & LUNDGREN, C.; 1995. *Volume and taper equations for Pinus radiata in Walcha. New South Wales. Australia*. Unpublished internal Report. State Forest of New South Wales.
- KOZAK, A.; MUNRO, D. & SMITH, J.; 1969. Taper functions and their application in forest inventory. *For. Chro.* 45(4): 278-283.
- LEBAN, J.M. & HERVÉ, J.C.; 1999. *Product properties prediction-improved simulation in the forestry-wood chain applied on spruce sawnwood, Final Report sub-task A2.1: Project STUD*. Documento interno INRA-UMR.
- NEWHAM, R.; 1988. A variable-form taper function. *Forest Canada. Petawawa National Forestry Institute, Inf. Rep. PI-X_83*: 1-33.
- RIEMER, T.; GADOW, K.V. & SLODOBA, B.; 1995. Ein Modell zur Beschreibung Baumschäften. *Allg. Forst. Jadtg.* 166(7): 144-147.
- SAINT-ANDRÉ, L.; LEBAN, J.M.; HOULLIER, F. & DAQUITAINE, R.; 1999. Comparaison de deux modèles de profil de tige et validation sur un échantillon indépendant. Application à l'épicéa commun dans le nord-est de la France. *Ann. For. Sci.* 56: 121-132.
- THOMAS, C. & PARRÉSOL, B.; 1991. Simple, flexible, trigonometric taper equations. *Can. J. For. Res.* 21: 1132-1137.