

VALIDACIÓN DE UN MODELO DE TAMAÑO DE COPA DE *PINUS SYLVESTRIS* L. EN BOSQUES DEL SISTEMA CENTRAL

Celia Herrero de Aza y Felipe Bravo-Oviedo

Unidad Mixta Uva-INIA. Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid. Avda. Madrid 44. 34004-PALENCIA (España). Correo electrónico: chdeaza@pvs.uva.es

Resumen

El tamaño y forma de la copa un árbol tienen una gran importancia en la dinámica del rodal. Sus características, apertura, perfil, volumen, porosidad y su desarrollo determinan la competencia que se ejercen los individuos, el crecimiento en altura y el crecimiento en área basimétrica de la estructura forestal. En este sentido, el objetivo de este estudio es validar cuatro parámetros pertenecientes a un modelo de copa desarrollado por DOMÍNGUEZ *et al.* (2006), para bosques de *Pinus sylvestris* del centro de España. Los parámetros analizados han sido la relación de copa, la máxima anchura de copa, la altura a la base de la copa y la altura al punto de máxima anchura de copa. Para ello, utilizamos datos independientes procedentes de una red de parcelas en masas naturales de *Pinus sylvestris* en el Sistema Central.

Palabras clave: *Consistencia en la validación, Modelización, Pino albar, Parámetros de copa*

INTRODUCCIÓN

El estudio del tamaño y la forma de la copa tiene una importancia relevante en la dinámica del rodal. La copa no representa el estatus social y el nivel de competencia de un árbol únicamente en el presente, sino también su situación en el pasado (MITCHELL, 1975), ya que la arquitectura de la copa va cambiando a través del desarrollo del rodal debido al crecimiento, a la competencia entre individuos y a los tratamientos selvícolas llevados a cabo en el rodal (MÄKINEN & COLIN, 1998; MEREDIEU *et al.*, 1998).

Las características de la copa determinan, entre otros, el vigor del árbol, la capacidad fotosintética, el desarrollo del individuo y el hábitat para la vida silvestre. La relación entre biodiversidad y tamaño y forma de la copa ha sido constatada en numerosos trabajos, especialmente en el caso de la

avifauna (MOEUR, 1981; MORRISON *et al.*, 1987; HEDMAN & BINKLEY, 1988; HANN, 1999; HUNTER, 1999). Estos parámetros, muy influidos por la densidad del rodal y la competencia, las condiciones de la estación, la especie y la edad, son claves en la descripción de la gestión forestal sostenible ejecutada en el rodal. El crecimiento después de un tratamiento selvícola dependerá de los cambios producidos en la estructura de la copa, longitud y anchura de la copa, distribución del follaje, concentración y cantidad de nutrientes, etc. (GOUGH *et al.*, 2004; VOSE, 1988; BRIS, 1981; GILLESPIE *et al.*, 1994), de ahí la importancia de introducir variables que describan la estructura del rodal en los modelos (WEISKITTEL *et al.*, 2007).

DOMÍNGUEZ *et al.* (2006) desarrollaron cuatro modelos para estimar distintos parámetros de copa de árboles de pino silvestre de Valsain y Navafria

en el Sistema Central. Los atributos de copa modelizados fueron relación de copa (CR), altura a la base de la copa (HCB), máxima anchura de copa (LCW) y altura al punto de máxima anchura de copa (HLCW). Estas características sirven para estimar índices de competencia en copa, altura y volumen de copa, así como índices de estructura que incluyen características del dosel de copas. El porcentaje de la copa viva o relación de copa, que representa el vigor del árbol, determina la estabilidad de un árbol, informando sobre el riesgo a ser dañado por el viento o la nieve, especialmente en masas jóvenes (ROTTMANN, 1985). La conformación de la copa está siempre influida por pequeñas diferencias de exposición al sol, a los vientos y por la pendiente que establece variaciones de anclaje y humedad alrededor del tronco (RUIZ DE LA TORRE, 1979). Por otro lado, la calidad de los productos maderables depende en parte de la copa, ya que ésta determina la ramificación y forma del fuste de un árbol (KRAMER & KOLOWSKI, 1979; OKER-BLOM *et al.*, 1988). Además, la relación de copa es una de las variables de copa más frecuentemente utilizada para predecir el crecimiento del árbol a lo largo del tiempo en diferentes especies (WYKOFF, 1990; BIGING & DOBBERTIN, 1992; HASENAUER & MONSERUD, 1996; BRAVO *et al.*, 2001).

Muy relacionada con el parámetro CR (fracción de copa) está la variable de la altura a la base de la copa (HCB) que representa la altura del fuste del árbol hasta la base de la copa. Los valores de este parámetro representan también el vigor del árbol, la estabilidad de la copa y el desarrollo del rodal, puesto que valores altos de HCB para un mismo valor de altura total (HT) implican menores longitud de copa viva. Por otro lado, la máxima anchura de la copa (LCW) representa el tamaño del árbol y la situación de competencia del mismo. Los árboles que presentan un mayor valor de esta variable indican que se desarrollan bajo condiciones de menor competencia de espacio y de luz. Finalmente, la altura en el punto de máxima anchura de copa (HLCW) representa la competencia y vigor del árbol y la producción foliar de la masa, pues indica a partir de qué altura se obtienen mayores valores de índice foliar, por tanto de la exposición a la cantidad de luz efectiva para realizar fotosíntesis (CHMURA *et al.*, 2007) y por tanto, de intercambio neto de CO₂, aspecto de vital importancia en el actual marco de cambio climático.

El objetivo de este trabajo es validar los modelos de copa disponibles para pino silvestre en el Sistema Central (DOMÍNGUEZ *et al.*, 2006). Para alcanzar este objetivo se han utilizado datos procedentes de parcelas independientes, no utilizadas para el desarrollo de los modelos validados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Datos

Los datos proceden de 4 parcelas de *Pinus sylvestris* de edades comprendidas entre 48 y 92 años, ubicadas en el Espinar (Segovia). Las parcelas se establecieron en una banda altitudinal de 1200 a 2000 m, en zonas muy productivas de pino silvestre. En las parcelas, de 30x30 m, se identificaron todos los árboles mediante numeración con el objeto de facilitar las mediciones de las variables y evitar confusiones. De cada árbol se midieron las siguientes variables: (1) Posición de cada árbol al centro de la parcela: se midió el rumbo y la distancia de cada árbol al centro de la parcela mediante estación total. (2) Diámetro normal (DBH). Se consideraron dos diámetros perpendiculares uno de otro, el primero de ellos en dirección al centro de la parcela y tomado a la altura de 1,3 m. Las mediciones se hicieron con forcípula y con precisión de 1 mm. (3) Altura total (HT). Se midió con hipsómetro Vertex con precisión de decímetro. (4) Altura a la base de la copa (HCB). Se consideró como base de la copa, el punto donde se inserta el primer conjunto de ramas vivas del árbol y que representen la base de una copa continua. Se ignoraron las ramas aisladas por debajo del nivel general de la copa, o las ramas muertas; se midió con hipsómetro Vertex, con una precisión de decímetro. (5) Altura de máxima amplitud de copa (HLCW). Se midió con hipsómetro Vertex la altura del punto estimado de forma visual en el que la copa posee su mayor anchura. Se midió con precisión de decímetro. (6) Máxima amplitud de copa o diámetro de copa (LCW). Se midió la proyección de la copa mediante dos diámetros perpendiculares, el primero de ellos en dirección al centro de la parcela. Se midió con una cinta métrica y con precisión de centímetro. Las características medias, máximas, mínimas y la desviación estándar de estos datos se muestran en la tabla 1.

Posteriormente se calcularon las siguientes variables: (1) Relación de copa (CR). Es la relación entre la longitud de copa y la altura total, (2) Área basimétrica (AB). Se obtiene a partir del diámetro a 1,3 m de altura como la sección circular correspondiente. Una vez calculada el área basimétrica individual se obtiene el Área basimétrica de la parcela en $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, (3) Área basimétrica de los árboles de mayor diámetro (BAL) que es la suma del área basimétrica de los árboles de mayor diámetro que el árbol dado. Se expresa en $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ (BIGING & DOBBERTIN, 1995).

Modelos utilizados

Los modelos validados fueron desarrollados por DOMÍNGUEZ *et al.* (2006), que utilizaron 305 observaciones en rodales de silvestre de tres clases de edad: 60-80, 80-100, y 100-120 años, en Valsaín (Segovia). Las características medias, máximas, mínimas y la desviación estándar de las observaciones utilizadas para la construcción de los modelos se muestran en la tabla 1.

Las expresiones obtenidas fueron las siguientes: *Relación de copa (CR)*

$$CR = \frac{1}{1 + e^{\left(-\left(1.5057 - \left(0.706481 * Ht / DBH \right) - 0.078039 * Ht + 0.000182 * DBH^2 - 0.00762 * BAL \right) \right)}}$$

Altura a la base de la copa (HCB)

$$HCB = \frac{Ht}{1 + e^{\left(\left(0.845435 - 0.040666 * Ht + 0.418976 * \text{Log}(AB) + 0.637408 * DBH / Ht \right) \right)}}$$

Máxima anchura de copa (LCW)

$$LCW = (1.303632 + 0.149361 * DBH) * CR^{0.175496}$$

Altura en el punto de máxima anchura de copa (HLCW)

$$HLCW = \frac{Ht}{1 + e^{(-2.1581 + 3.0495 * CR)}}$$

Validación de los modelos

El número de observaciones utilizado para la validación fue de 199 observaciones. Una vez disponibles los datos y preparados los modelos el objetivo era validar las cuatro expresiones que estimaban los parámetros de la copa. Con la validación de los modelos incrementamos la credibilidad, creamos suficiente fiabilidad acerca de un modelo y aseguramos que la predicción del modelo represente la realidad.

Además de realizar un análisis gráfico de los datos observados frente a los predichos por los modelos, utilizamos los siguiente parámetros estadísticos para validar los modelos: el Error medio y relativo del modelo (MRES y MRES(%)) y la Diferencia media y relativa absoluta (AMRES y AMRES(%)) y el error relativo en la predicción RE(%) cuyas expresiones son:

$$Mres = \frac{\sum (\text{observados} - \text{predichos})}{n}$$

$$AMRES = \frac{\sum \text{abs} (\text{observados} - \text{predichos})}{n}$$

$$RE(\%) = 100 * \sqrt{\frac{\sum (\text{observados} - \text{predichos})^2}{n}}$$

$$Mres(\%) = 100 * \left(\frac{Mres}{y} \right)$$

$$AMRES(\%) = 100 * \left(\frac{AMRES}{y} \right)$$

Variable	Datos del modelo (305 obs)				Datos de la validación (199 obs)			
DBH (cm)	30,5	71,0	5,00	15,8	34,6	53,8	13,6	8,2
G ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$)	39,8	74,6	6,95	15,9	54,8	71,2	40,2	16,2
Ht (m)	19,1	36,0	3,30	7,11	23,8	33,3	14,5	3,5
CR	39,8	0,89	0,05	0,17	0,3	0,92	0,14	0,08
HCB (m)	12,0	30,0	1,30	6,27	16,7	25,1	1,70	3,7
LCW (m)	4,89	12,1	1,24	2,23	4,6	10,7	1,45	1,4
HLCW (m)	13,9	32,0	1,30	6,31	18,8	18,8	11,4	3,6

Tabla 1. Características de las variables de los datos utilizadas en los modelos y en su validación

donde: *Observados*: Valor observado o real. *Predichos*: Valor estimado con el modelo. *n*: Número de observaciones en la validación de los modelos. \bar{y} : Valor promedio de los valores observados o reales

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores obtenidos en los distintos estadísticos utilizados para validar los cuatro modelos se muestran en la tabla 2. Si analizamos el error medio (MRES (%)) vemos como es menor del 20% en los parámetros de relación de copa (-0,04%), en la amplitud máxima de copa (13,1%) y en la altura de máxima anchura de copa (1,98). Si bien, en el parámetro de altura de inicio de copa este valor es superior al 20% considerado como no válido por HUANG *et al.* (2003), alcanzando un valor de 33,74%. Si nos fijamos en el signo de cada uno de los errores relativos, vemos como los parámetros relación de copa y altura de inicio de copa, así como Altura de la máxima amplitud de copa son infraestimados por el modelo, mientras que la amplitud máxima de la copa es sobrevalorada por el modelo.

Si analizamos estos mismos datos en cada una de las clases diamétricas muestreadas (Tabla 3) vemos que la distribución del error es diferen-

te. Así, en el parámetro relación de copa, en las clases diamétricas extremas, inferior y superior, el error adquiere valores superiores al 20%, si bien se trata de las clases diamétricas con menor número de datos. En las clases diamétricas medias, el error se mantiene por debajo del 10%. Por otro lado, en el parámetro Altura de inicio de copa, los valores alcanzados, superiores a 20%, siempre positivos y siguiendo una tendencia ascendente a lo largo del aumento del diámetro, alcanzando valores más elevados en las clases diamétricas más altas. Por último, en los parámetros donde se analiza la amplitud máxima de la copa encontramos valores inferiores al 20% en la máxima amplitud e inferiores al 10% en la altura de máxima amplitud de copa.

Los valores de los otros estadísticos analizados presentan resultados similares. Finalmente, en el parámetro de la altura de la base de la copa, los errores medios y absolutos coinciden en valor y signo debido a que el valor observado siempre es superior al predicho, por lo que el modelo infraestima la altura a la que se inicia la copa viva en todo momento.

Gráficamente (Figura 1), podemos ver la evolución del estadístico MRES (%) en cada uno de los cuatro parámetros validados CR (figura a), LCW (figura b), HBC (figura c), HLCW (figura d). En estas figuras se represen-

ERROR	Mres_CR	AMRES_CR	RE_CR	Mres_HBC	AMRES_HBC	RE_HBC	Mres_LCW	AMRES_LWC	RE_LCW	Mres_HLCW	AMRES_HLCW	RE_HLCW
relativo	0,00	0,06	0,08	5,68	5,68	6,02	-0,60	0,85	1,07	0,37	0,84	1,05
%	-0,04	19,93		33,94	33,94		-13,10	18,52		1,98	4,47	

Tabla 2. Estadísticos de validación de los modelos

cd	n	CR		HBC		LCW		HLCW	
		%MRES CR	%AMRES CR	%MRES HBC	%AMRES HBC	%MRES LCW	%AMRES LCW	%MRES HLCW	%AMRES HLCW
15	6	-35,36	27,84	28,52	28,52	-11,00	17,07	2,36	4,18
20	17	-6,31	14,24	25,52	25,52	-14,37	18,06	-0,69	5,51
25	42	-9,18	19,90	30,68	30,68	-11,63	17,78	3,25	4,37
30	41	-1,43	21,28	31,92	31,92	-17,91	22,65	2,46	4,97
35	41	6,59	19,76	35,28	35,28	-11,73	18,25	1,11	3,66
40	29	9,50	18,42	36,94	36,94	-16,80	19,43	2,04	4,51
45	17	8,72	18,75	42,61	42,61	-6,43	15,51	2,76	4,85
50	6	15,65	34,34	42,61	42,61	-8,97	11,51	-0,19	3,36

Tabla 3. Estadísticos de validación por clases diamétricas

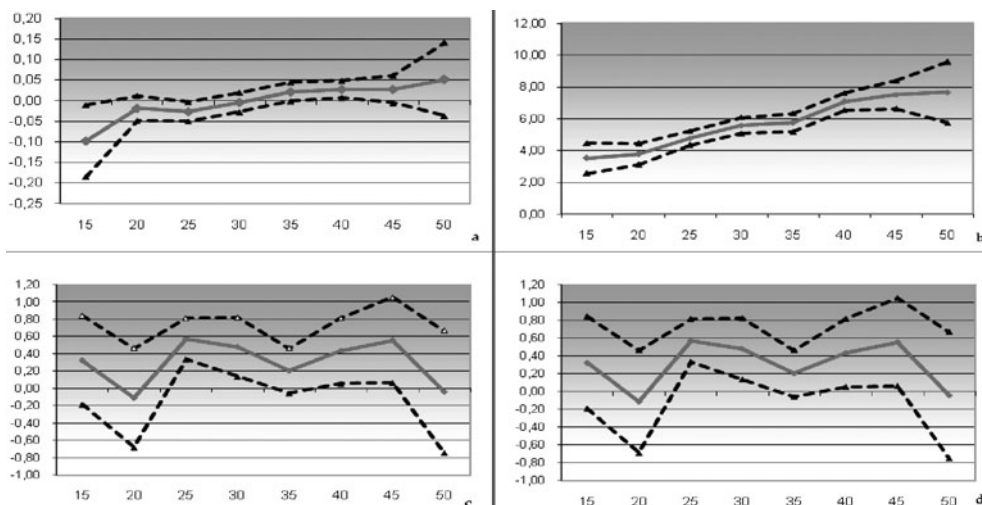


Figura 1. Gráficos del estadístico MRES (%) por clases diamétricas (en abcisas) en cada uno de los parámetros considerados (en ordenadas): a)CR, b)LCW, c)HBC, d)HLCW

tan el valor de MRES (%) (en línea continua) a lo largo del rango de clases diamétricas considerado, así como los límites de los intervalos de confianza asociado al 95% (en línea discontinua). Los gráficos de los otros estadísticos analizados presentan información similar a la facilitada por el MRES (%).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del proyecto del Plan Regional de I+D de la Junta de Castilla y León “Estructura, dinámica y selvicultura para la conservación y el uso sostenible de los bosques en el Sistema Central”, código VA096A05, y a una beca del programa de becas de la Universidad de Valladolid.

BIBLIOGRAFÍA

BIGING, G.S. & DOBBERTIN, M.; 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *For. Sci.* 38: 695-720.
 BRAVO, F.; HANN, D.W. & MAGUIRE, D.A.; 2001. Impact competitor species composition on predicting diameter growth and sur-

vival rates of Douglas fir trees in southwest Oregon. *Can. J. For. Res.* 31: 2237-2247.
 BRIX, H.; 1981. Effects of nitrogen fertilizer and application rates on foliar nitrogen concentration, photosynthesis, and growth of Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 11: 775-780.
 CHMURA, D.J.; RAHMAN, M.S. & TJOELKER, M.G.; 2007. Crown structure and biomass allocation patterns modulate aboveground productivity in young loblolly pine and slash pine. *Forest Ecol. Manage.* 243: 219-230.
 DOMÍNGUEZ, M.; BRAVO, F. & DEL RÍO, M.; 2006. Modelos del tamaño de copa de *Pinus sylvestris* L. en bosques del Centro de España. *Interciencia.* MAR 31(3).
 GILLESPIE, A.R. ; ALLEN, H.L. & VOSE, J.M. ; 1994. Amount and vertical distribution of foliage of young loblolly pine trees as affected by canopy position and silvicultural treatment. *Can. J. For. Res.* 24: 1337-1344.
 GOUGH, C.M.; SEILER, J.R. & MAIER, C.A.; 2004. Short-term effects of fertilization on loblolly pine (*Pinus taeda* L.) physiology. *Plant Cell Environment* 27: 876-886.
 HASENAUER, H. & MONSERUD, R.A.; 1996. A crown ratio model for Austrian forest. *Forest Ecol. Manage.* 84: 49-60.

- HEDMAN, C.W. & BINKLEY, D.; 1988. Canopy profiles of some Piedmont hardwood forest. *Can. J. For. Res.* 18: 1090-1093.
- HANN, D.W.; 1999. An adjustable predictor of crown profile for stand-grown Douglas-fir trees. *For. Sci.* 45: 217-225.
- HUANG, S.; YANG, Y. & WANG, Y.; 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. In: A. Amaro, A. Reed & P. Soares (eds.), *Modelling Forest Systems: 271-293*. CABI Publishing, Wallingford.
- HUNTER, M.L.; 1999. *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- KRAMER, P.J. & KOLOWSKI, T.T.; 1979. *Physiology of woody plants*. Academic Press, New York.
- MÄKINEN, H. & COLIN, F.; 1999. Predicting the number, death, and self-pruning of branches in Scots pine. *Can. J. For. Res.* 29: 1225-1236.
- MEREDIEU, C.; COLIN, F. & HERVÉ, J.C.; 1998. Modeling branchiness of Corsican pine with mixed-effect models (*Pinus nigra* Aronld ssp. *laricio* (Poir) Maire). *Ann. Sci. For.* 55: 359-374.
- MITCHELL, K.J.; 1975. Dynamics and simulated yield of Douglas-fir. *For. Sci. Monogr.* 17: 1-39
- MOEUR, M.; 1981. *Crown width and foliage weight of northern Rocky Mountain conifers*. USDA For. Serv. Res. Par. INT-283.
- MORRISON, M.L.; TIMOSI, I.C. & KIMBERLY, A.W.; 1987. Development and testing of linear regression models predicting bird-habitat relationships. *J. Wild. Manage.* 51: 247-253.
- OKER-BLOM, P.; KELLOMÄKI, S. & VALTONEN, E.; 1988. Structural Development of *Pinus sylvestris* Stands with varying Initial Density: a Simulation Model. *Scan. J. For. Res.* 3: 185-200.
- ROTTMANN, M.; 1985. Waldbauliche Konsequenzen aus Schenebruch katastrophen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 136: 167-184.
- RUIZ DE LA TORRE, J.; 1979. *Árboles y arbustos de la España peninsular*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.
- VOSE, J.M.; 1988. Patterns of leaf area distribution within crowns of nitrogen and phosphorus-fertilized loblolly pine trees. *For. Sci.* 34, 564-573.
- WEISKITTEL, A.R.; MAGUIRE, D.A. & MONSERUD, R.A.; 2007. Modeling crown structural responses to competing vegetation control, thinning, fertilization, and Swiss needle cast in coastal Douglas-fir of the Pacific Northwest, USA. *Forest Ecol. Manage.* 245: 96-109.
- WYKOFF, W.R.; 1990. A basal area increment model for individual conifers in the northern rocky mountains. *For. Sci.* 36: 1077-1104.