

MODELO DINÁMICO DE CRECIMIENTO PARA CHOPERAS DEL CLON ‘I-214’ EN LA MESETA CENTRO Y NORTE DE ESPAÑA

Marcos Barrio-Anta¹, Hortensia Sixto-Blanco², Isabel Cañellas-Rey de Viñas² y Fernando Castedo-Dorado³

¹ Dpto. de Biología de Organismos y Sistemas. Universidad de Oviedo. Escuela Universitaria de Ingenierías Técnicas. c/Gonzalo Gutiérrez s/n. 33600-MIERES (Asturias-España). Correo electrónico: barriomarcos@uniovi.es

² Dpto. de Sistemas y Recursos Forestales, CIFOR-INIA. Ctra. A Coruña km 7. 28080-MADRID (España)

³ Dpto. de Ingeniería Agraria, Universidad de León. Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria. Avenida de Astorga s/n. 24400-PONFERRADA (León-España)

Resumen

En este trabajo se presenta un modelo dinámico de crecimiento y producción para el clon de chopo I-214 en la meseta centro y norte de España. El modelo es un sistema jerárquico compuesto por tres componentes: dos funciones de transición para proyectar la altura media y el área basimétrica, respectivamente, y una tarifa de volumen comercial de masa basada en un modelo de razón de masa. En el modelo, las condiciones de la masa en un instante cualquiera son definidas por dos variables de estado: altura media y área basimétrica. La información de estas variables de estado proyectadas hasta un instante futuro puede ser incorporada a un sistema de volumen de masa que permite estimar el volumen comercial hasta un determinado diámetro en punta delgada. El error crítico global del modelo indicó que éste proporciona predicciones satisfactorias para intervalos de proyección entre uno y cuatro años.

Palabras clave: *Populus x euramericana*, GADA, Modelo de crecimiento de masa, Volumen comercial

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una gran variedad de tipos de modelos para estimar el crecimiento y producción de las masas forestales que difieren tanto en su complejidad como en el detalle con el que describen la masa. La elección del tipo de modelo más adecuado depende de (GARCÍA, 2003): (i) el propósito de su aplicación, (ii) las características de la masa, (iii) los recursos disponibles y (iv) de la amplitud de proyección. Los modelos de masa son el tipo recomendado cuando se trabaja con masas regulares, homogéneas y puras (GARCÍA, 1988, 1993; VANCLAY, 1994),

debido a que se pueden construir usando variables que se obtienen fácilmente a partir de los datos recogidos en los inventarios forestales ordinarios y porque son un buen compromiso entre generalidad y precisión de las estimaciones (DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2006). Estos modelos caracterizan el estado de la masa por medio de un pequeño número de variables de agregación como el área basimétrica (G), el diámetro medio cuadrático (dg), el volumen por hectárea (V), el número de pies por hectárea (N), la altura dominante (H_0), la altura media (H), etc. (GARCÍA, 1993). Cuando estas variables de agregación proceden de un único inventario, sólo es posible des-

arrollar un modelo de masa estático. Sin embargo, cuando se dispone de datos de más de un inventario de las mismas parcelas, las trayectorias de las variables agregadas permiten el desarrollo de modelos dinámicos, que permiten predecir la tasa de cambio de cualquier variable de masa. La integración de esas ecuaciones (o suma con tiempos discretos) proporcionan una mejor descripción del desarrollo de la masa en el tiempo que los modelos estáticos (GARCÍA, 1988).

Las plantaciones intensivas de chopo son una importante fuente suministradora de materia prima para las industrias madereras españolas. Esto es debido tanto a la superficie que ocupan, unas 132.000 ha (MAPA, 2005), como a su alta productividad, cifrada entorno a los $12 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (HERNANZ, 2001). El clon más ampliamente usado es el *Populus x euramericana* "I-214", que representa hasta el 70% de las choperas de Castilla y León. Sin embargo, a pesar de su importancia, apenas existen modelos de crecimiento y producción para las plantaciones de chopo. El único estudio para la cuenca del Duero es el realizado por BRAVO et al. (1996), a partir del cual se elaboraron tablas de producción de selvicultura media observada (MADRIGAL et al., 1999). Otros estudios se refieren a aspectos parciales del crecimiento y la producción o a localizaciones específicas (p.ej. PADRÓ, 1982; PADRÓ Y HERNÁNDEZ, 1983; RODRÍGUEZ, 2005).

MATERIAL Y MÉTODOS

Datos empleados

Para la elaboración del modelo se usaron datos recogidos a lo largo de las tres últimas décadas en 198 parcelas de la red de ensayos

experimentales instalados por el CIFOR-INIA y que fueron remedidas entre dos y doce veces cada una. Debido a que el objetivo principal de los ensayos fue determinar el efecto de diversas prácticas culturales en el crecimiento y la producción, se ha contado con una base de datos que cubre un rango amplio de estados selvícolas y niveles de producción. Por otra parte, al estar las variables respuesta afectadas por estas prácticas, puede considerarse que los efectos de esos tratamientos están implícitamente considerados en el modelo. En la tabla 1 se muestran los estadísticos descriptivos de las principales variables de masa.

Estructura del modelo

El modelo propuesto se basa en el espacio de estados (GARCÍA, 1994), el cual hace uso de variables de estado para caracterizar el sistema inicialmente, y de funciones de transición para proyectar todas o alguna de estas variable hacia el futuro. Para masas no aclaradas, un vector bidimensional que considere H y G como variables explicativas se considera suficiente para describir el estado de la masa en un momento determinado (PIENAAR & TURNBULL, 1973). La inclusión de N como variable de estado adicional no fue considerada ya que la mortalidad tiene poca importancia en masas gestionadas intensivamente (GARCÍA, 1993), más aún en plantaciones de chopo, donde los árboles se plantan muy espaciados y donde la mortalidad por competencia se puede considerar nula. Por tanto, el estado de la masa se caracterizó mediante las variables H y G, que se proyectan hacia el futuro mediante funciones de transición. Las estimaciones de estas proyecciones sirven de entrada para el tercer submodelo, el cual predice el volumen total o comercial de masa a una edad determinada.

Variable de masa	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
<i>t</i>	6,40	2,00	13,00	2,87
<i>H</i>	16,38	2,42	28,20	5,53
<i>G</i>	13,88	2,12	26,95	6,80
<i>N</i>	264,97	250,00	505,05	21,10
<i>dg</i>	25,91	10,78	37,36	7,05
<i>V</i>	102,85	1,34	295,83	79,73

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de los datos usados en el desarrollo del modelo. *t* = edad de masa (años), *H* = altura media de masa (m), *G* = área basimétrica ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), *N* = número de pies por ha, *dg* = diámetro medio cuadrático (cm), *V* = volumen total de masa ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)

Funciones de transición en altura media y en área basimétrica

Las funciones de crecimiento de H y G son componentes claves del modelo de masa ya que estas variables están directamente relacionadas con otras de gran importancia económica como V . La calidad de estación se ha determinado usualmente mediante el uso de la altura dominante, a pesar de que esta puede estar influenciada por variaciones en la densidad de partida de la masa o por las cortas intermedias (MERIDIEU et al., 2003). Sin embargo, USTA (1983, citado en BIRLER, 1985) no encontró ninguna relación entre el espaciamiento de la masa y H para el clon I-214 cuando el espacio disponible para cada árbol era mayor de 12 m². Estos espacios habitualmente son mayores, ya que en las plantaciones clonales de chopo para la producción de madera de desenrollo, las claras no se consideran económicamente viables, por lo que las plantaciones se hacen muy espaciadas. Por lo tanto, en estas plantaciones H se considera un buen indicador de la productividad de la estación.

Las funciones de transición consideradas en este trabajo fueron derivadas mediante la técnica de ecuaciones en diferencias algebraicas generalizadas (GADA) (CIESZEWSKI & BAILEY, 2000) y fueron tomadas de BARRIO et al. (2006).
Estimación del volumen total y comercial

La estimación del volumen comercial de las masas forestales es necesaria para una valoración más precisa de la producción. En este trabajo se han empleado ecuaciones de volumen comercial de masa basadas en modelos de razón. Aunque tradicionalmente la predicción del volumen comercial por esta metodología se ha basado en ajustar separadamente un modelo de volumen total y posteriormente una razón de volumen, tal y como apuntan GREGOIRE & SCHABENBERGER (1996), parece más razonable incluir ambos términos en un único modelo compuesto, en el cual el volumen total es un caso especial del volumen comercial cuando el diámetro límite (d_i) es igual a cero. Estos modelos compuestos incorporan el modelo alométrico para determinar el volumen total de masa (con H y G como variables independientes). Se consideraron tres diferentes modelos de razón que usan d_g y d_i como variables independientes: (i) el propuesto por BURKHART (1977), (ii) la modificación del mode-

lo desarrollado por VAN DEUSEN et al. (1981), añadiendo un tercer parámetro (CLARK Y THOMAS, 1984) y (iii) una versión modificada (incluyendo la altura como variable adicional) del modelo de REED Y GREEN (1984). En todos los modelos originales, las variables de árbol fueron reemplazadas por las equivalente variables de masa (p.ej. altura de árbol fue reemplazada H y diámetro normal por d_g).

Ajuste del modelo

Las tendencias individuales de H y G pueden ser modelizadas considerando que las respuestas individuales de todas las parcelas presentan una forma funcional similar con parámetros que varían entre individuos (parámetros locales) y otros que son comunes a todos los individuos (parámetros globales). Por otra parte, los datos de las variables de estado en el ajuste de las funciones de transición aparecen unas veces a la izquierda y otras a la derecha de la ecuación (es decir, unas veces se considera que poseen error y otras no, lo cual es una incoherencia). Para solucionar este problema surgen los métodos de ajuste invariantes en edad de referencia (BAI) que consideran que las medidas siempre contienen errores. Entre los posibles métodos BAI, en este trabajo se ha usado el "dummy variable approach" (CIESZEWSKI et al., 2000) que estima simultáneamente los parámetros locales y globales del modelo.

La dependencia de los datos usados en el ajuste de las funciones de transición, se corrigió modelizando el término del error mediante una estructura continua autorregresiva de orden 3 (CAR (3)). Esta estructura fue igualmente considerada en el ajuste del sistema de volumen debido a la correlación espacial existente en los datos del modelo de razón de masa. Los parámetros de autocorrelación se desecharon para el uso práctico del modelo ya que el único propósito de su uso fue el de obtener unas estimaciones más eficientes de los parámetros.

Comparación y evaluación del modelo

Los estadísticos de comparación usados para comparar las estimaciones de los modelos fueron la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el R². Además se llevó a cabo un examen visual de las curvas ajustadas superpuestas sobre las tra-

yectorias de las variables dependientes de cada parcela. Este paso es esencial en la selección del mejor modelo puesto que los perfiles de las curvas pueden ser muy diferentes incluso cuando los estadísticos de comparación son similares (HUANG et al., 2003; BARRIO et al., 2006).

Para determinar el intervalo de proyección más adecuado se representaron, frente al intervalo de proyección, el RMSE y el error crítico (E_{crit}), calculado readaptando el estadístico χ_n^2 (REYNOLDS, 1984), para H , G y V , respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por lo que respecta a la ecuación de crecimiento en H , todos los modelos empleados convergieron y fueron significativos a un $\alpha=5\%$. Sin embargo, en los tres modelos con dos parámetros relacionados con la estación, algún parámetro resultó no significativo. El modelo que mostró los mejores estadísticos de comparación y el mejor comportamiento gráfico (Figura 1, izquierda) fue el que aparece a continuación (1):

$$H = 39,27509 \left(1 - \left(1 - \left(\frac{IS}{39,27509} \right)^{1/1,112079} \right)^{1/8} \right)^{1,112079};$$

$$RMSE = 0,50 \text{ m}; R^2 = 0,99 \tag{1}$$

donde H (m) es la altura media de la masa, IS (m) es el índice de sitio (altura media de masa a la edad de 8 años) y t (años) la edad a la cual queremos estimar H .

Respecto a la ecuación de crecimiento en G , los modelos con dos parámetros relacionados con la estación se comportaron mejor que aquellos

que tenían solo uno. Considerando los valores de los estadísticos de comparación y el aspecto de las curvas, superpuestas con las trayectorias de los datos reales (Figura 1, derecha), se eligió el modelo (2) como mejor compromiso entre comportamiento biológico y bondad de ajuste.

$$G = \frac{12,94405 + X_0}{1 + 3242,10/X_0 t^{-2,638913}}, \text{ donde}$$

$$X_0 = \frac{1}{2} \left(G_0 - 12,94405 + \sqrt{(G_0 - 12,94405)^2 + 43242,102 G_0 t_0^{-2,638913}} \right);$$

$RMSE = 0,57 \text{ m}^2/\text{ha}; R^2 = 0,99$
 donde G ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) es el área basimétrica a la edad t (años) y G_0 ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) el área basimétrica a la edad t_0 (años).

Respecto al sistema de volumen comercial, el modelo (3) mostró los mejores resultados de los estadísticos de comparación. Este modelo permite obtener el volumen de la masa en un instante determinado una vez conocidos H , G y dg en ese instante. Dicho valores se pueden obtener a partir de inventarios forestales ordinarios o bien a partir de las funciones de transición (1) y (2).

$$Vi = 0,362808 G^{0,978341} H^{1,050589} \exp(0,32504 d_i^{4,793647} dg^{-4,33377}); \tag{3}$$

$RMSE = 0,33 \text{ m}^3/\text{ha}; R^2 = 0,99$
 donde Vi ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) es el volumen comercial de la masa hasta un diámetro límite d_i (cm) y dg (cm) el diámetro medio cuadrático.

Considerando la precisión requerida en los modelos forestales de crecimiento y producción,

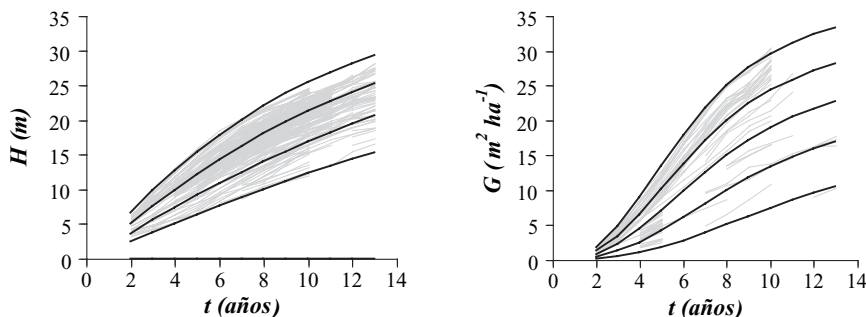


Figura 1. Evolución de H y G con la edad según las funciones de transición elegidas

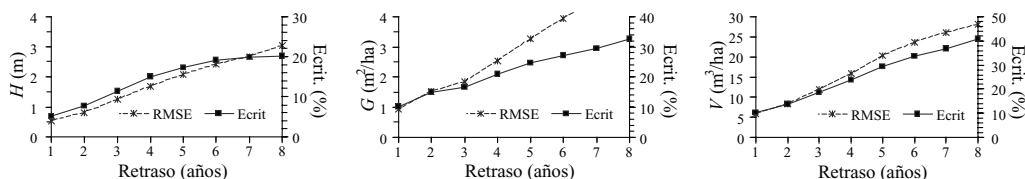


Figura 2. Gráficos del Error crítico y el RMSE para las predicciones de altura media (H), área basimétrica (G) y volumen total (V) frente a diferentes intervalos de proyección (retrasos). V se calculó usando los valores proyectados de H y G

parece razonable y realístico usar un error de ± 10 -20% a un $\alpha=5\%$ como límite para aceptar o rechazar las predicciones. Considerando el valor límite del 20% de error y usando el E_{crit} y el RMSE para determinar el error de las predicciones para diferentes intervalos temporales, se puede establecer que los modelos de crecimiento en H , G y V_i (en este último caso usando la H y G proyectadas con los modelos (1) y (2)) proporcionan estimaciones satisfactorias para intervalos de proyección de hasta 8, 4 y 4 años, respectivamente (Figura 2). Para intervalos de proyección mayores se debería llevar a cabo un nuevo inventario como punto de partida de las nuevas estimaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- BARRIO, M.; CASTEDO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ÁLVAREZ, J.G.; PARRESOL, B.R. & RODRÍGUEZ, R.; 2006. Development of a basal area growth system for maritime pine in northwestern Spain using the generalized algebraic difference approach. *Can. J. For. Res.* 36: 1461-1474.
- BIRLER, A.S.; 1985. A study of yields from "I-214" poplar plantations. Poplar and Fast Growing Exotic Forest Trees Research Institute. Izmit, Turkey.
- BRAVO, F.; GRAU, J.M. Y GONZÁLEZ ANTOÑANZAS, F., 1996. Análisis de modelos de producción para *Populus x euramericana* en la cuenca del Duero. *Inv. Agrar.; Sist. Rec. For.* 5(1): 77-95.
- BURKHART, H.E.; 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. *South. J. Appl. For.* 1: 7-9.
- CIESZEWSKI, C.J. & BAILEY, R.L.; 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.* 46: 116-126
- CIESZEWSKI, C.J.; HARRISON, M. & MARTIN, S.W.; 2000. *Practical methods for estimating non-biased parameters in self-referencing growth and yield models*. University of Georgia PMRC-TR 2000-7.
- CLARK, A. & THOMAS, C.E.; 1984. Weight equations for southern tree species. When are and what is needed. In: R.F. Daniels & P.H. Dunhan (eds.), *Proceedings of the 1983 southern forest biomass workshop*: 100-106. N.C. USDA Forest Service. Southern Forest Experimental Station. Charleston, S.C. Asheville.
- DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CASTEDO, F.; ÁLVAREZ, J.G. & ROJO, A.; 2006. Dynamic growth model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia (north-western Spain). *Ecol. Model.* 191: 225-242.
- GARCÍA, O.; 1988. Growth modelling – a (re)view. *N.Z.J. For. Sci.* 33(3): 14-17.
- GARCÍA, O.; 1993. Stand growth models: Theory and practice. In: *Advancement in Forest Inventory and Forest Management Sciences. Proceedings of the IUFRO Seoul Conference*: 22-45 Forestry Research Institute of the Republic of Korea. Seul.
- GARCÍA, O.; 1994. The state-space approach in growth modelling. *Can. J. For. Res.* 24: 1894-1903.
- GARCÍA, O.; 2003. Dimensionality reduction in growth models: an example. *FBMIS* 1: 1-15.
- GREGOIRE, T.G. & SCHABENBERGER, O.; 1996. A non-linear mixed-effects model to predict cumulative bole volume of standing trees. *J. Appl. Stat.* 23: 257-271.
- HERNANZ, G.; 2001. La industria del chopo en España. En: *Actas de Populicultura en*

- Castilla y León, *I simposio del chopo*: 419-434. Junta de Castilla y León.
- HUANG, S.; YANG, Y. & WANG, Y.; 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. *In*: A. Amaro, D. Reed, & P. Soares (eds.), *Modelling forest systems*: 271-293. CAB International. Wallingford, Oxfordshire.
- MADRIGAL, A.; ÁLVAREZ, J.G.; RODRÍGUEZ, R. Y ROJO, A.; 1999. *Tablas de producción para los montes españoles*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.
- MAPA; 2005. *Encuesta sobre superficie y rendimientos de cultivos*. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Estadísticas Agroalimentarias. Madrid.
- MERIDIEU, C.; PERRET, S. & DREYFUS, P.; 2003. Modelling dominant height growth: effect of stand density. *In*: A. Amaro, D. Reed & P. Soares (eds.), *Modelling forest systems*: 111-121. CAB International. Wallingford, Oxfordshire.
- PADRÓ, A.; 1982. Curvas de productividad del clon "I-214" en regadío con planta R2T2 y marco 6 x 6 en el valle medio del Ebro. *Anales INIA, Ser. Forestal* 6: 63-73.
- PADRÓ, A. Y HERNÁNDEZ, M.; 1983. Dualidad turno-espaciamiento en choperas. Estudio de un caso concreto. *Anales INIA, Ser. Forestal* 7: 83-97.
- PIENAAR, L.V. & TURNBULL, K.J.; 1973. The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *For. Sci.* 19(1): 2-22.
- REED, D. & GREEN, E.; 1984. Compatible stem taper and volume ratio equations. *For. Sci.* 30: 977-990.
- REYNOLDS JR., M.R.; 1984. Estimating the error in model predictions. *For. Sci.* 30: 454-469.
- RODRÍGUEZ, F.; 2005. *Modelos de producción de las choperas del valle del Cinca*. Tesis doctoral. Universitat de Lleida. Lleida.
- VAN DEUSEN, P.C.; SULLIVAN, A.D. & MATNEY, T.G.; 1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *South. J. Appl. For.* 5: 186-189.
- VANCLAY, J.K.; 1994. *Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests*. CAB International. Wallingford.