

**6º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL**

6CFE01-099

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Modelo dinámico de crecimiento y producción de biomasa para cultivos energéticos de *Eucalyptus nitens* (Maiden) en el noroeste de España

GONZÁLEZ GARCÍA, M.¹, HEVIA CABAL, A.¹, BARRIO ANTA, M.²

¹ Centro Tecnológico Forestal y de la Madera de Asturias (CETEMAS).

² Dpto. de Biología de Organismos y Sistemas. Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Mieres.

Resumen

En los últimos años las plantaciones a turno corto de *Eucalyptus nitens* se han extendido por el noroeste de España debido a su creciente interés para la producción energética. Las elevadas tasas de crecimiento que estas presentan así como sus altas densidades (2.000-5.600 pies ha⁻¹), muy superiores a las de las plantaciones tradicionales de eucalipto, permiten obtener elevadas producciones de biomasa en cortos períodos de tiempo. El objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo dinámico de crecimiento para este tipo de plantaciones en el norte de España, para lo cual se emplearon datos procedentes de la remediación de 40 parcelas permanentes instaladas en Galicia. El modelo está formado por dos funciones de transición que permiten proyectar el área basimétrica y la altura dominante. Adicionalmente se ajustaron funciones de salida de volumen y biomasa a partir de estas variables de masa. La metodología empleada en los modelos de crecimiento se basó en considerar ecuaciones en diferencias algebraicas (ADA), ecuaciones generalizadas en diferencias algebraicas (GADA) y el empleo del método de ajuste invariante en edad de referencia de variables dummy. Los submodelos finalmente seleccionados (área basimétrica, y altura dominante) fueron aquellos que presentaron mejores valores de los estadísticos de bondad de ajuste, los mejores comportamientos gráficos y el mayor realismo biológico.

Palabras clave

Eucalipto, modelo de crecimiento de masa, biomasa, volumen, cultivo corta rotación.

1. Introducción

Eucalyptus nitens es una especie con gran potencial para la producción de biomasa energética en el noroeste de España ya que posee un rápido crecimiento además de presentar resistencia a las bajas temperaturas. Este hecho hace que pueda ocupar terrenos en las zonas más altas donde *Eucalyptus globulus*, la principal especie de eucalipto en nuestro país, no puede habitar. Todo ello junto al interés por la biomasa como fuente de energía ha desencadenado que en los últimos años se hayan extendido las plantaciones energéticas de corta rotación de *E. nitens* por el noroeste peninsular.

Los modelos de crecimiento son herramientas muy útiles para predecir el desarrollo de una masa forestal. Estos modelos pueden clasificarse en modelos de árbol, cuando se predice el crecimiento de un pie individualmente, o de masa, para un rodal conjuntamente. Los modelos de masa son el tipo de modelo recomendado para plantaciones no aclaradas, regulares y homogéneas (GARCÍA, 1988, 1993; VANCLAY, 1994) ya que pueden ajustarse con variables de rodal como por ejemplo el área basimétrica, la altura dominante, el volumen

o la biomasa y que se pueden determinar de manera sencilla a partir de los diámetros normales y las alturas totales recogidas en inventarios dasométricos habituales.

Objetivos

El objetivo fundamental de este estudio es elaborar un modelo dinámico de masa que permita predecir el crecimiento de las plantaciones energéticas de *Eucalyptus nitens* en el noroeste de España. Este modelo estará formado por dos funciones de transición, área basal, y altura dominante, con el fin de proyectar el estado de la masa en un instante futuro. Adicionalmente, se pretende elaborar funciones de salida que predigan la biomasa aérea total y el volumen a partir de las variables de masa estudiadas, área basimétrica y altura dominante.

2. Metodología

2.1. Datos empleados

Los datos obtenidos para el ajuste del modelo dinámico proceden de la remediación de 40 parcelas permanentes instaladas en plantaciones energéticas de *E. nitens* situadas en el noroeste de España, en la comunidad autónoma de Galicia. Estas parcelas, las cuales cubren el rango de edades, calidades y densidades disponibles en este tipo de masas tienen una superficie de 400 m² (20 x 20 m). El rango de densidad de las mismas varía entre 2.000 y 5.600 pies ha⁻¹, distribuidas en líneas simples o doble fila sueca, con una edad entre 2 y 5 años.

Los inventarios dasométricos llevados a cabo en las parcelas se realizaron durante dos años consecutivos y recogieron las principales variables de árbol individual, diámetro normal y la altura total de cada uno de los pies, así como las correspondientes variables de copa y variables cualitativas. Con toda esa información se calcularon las variables de rodal de cada una de las parcelas que se usaron posteriormente para construir los modelos de crecimiento. En la tabla 1 se pueden observar los estadísticos descriptivos de las principales variables de árbol y de masa de las parcelas utilizadas en este estudio.

Tabla 1. Principales variables dasométricas de las parcelas empleadas para el ajuste del modelo.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
Edad (años)	2,00	5,00	3,35	0,74
Número de pies por hectárea	2.375	5.550	3.641	826
Área basimétrica (m ² ha ⁻¹)	1,97	19,30	9,38	4,67
Altura dominante (m)	4,28	13,35	7,71	2,07
Altura total (m)	1,83	9,43	4,79	1,97
Diámetro normal (cm)	1,32	9,12	4,34	1,79

2.2. Ajuste de las funciones de transición de área basal y altura dominante

Las variables área basal y altura dominante pueden ser usadas como variables de estado para masas no aclaradas, como es el caso de las plantaciones energéticas, cuando se quiere describir el estado de un rodal en un momento determinado (PIENAAR & TURNBULL, 1973). Esto se debe a que se trata de parcelas con altas densidades donde la tasa

de mortalidad entre inventarios es muy reducida, incluso en ocasiones nula, por lo que no se requiere ajustar una ecuación de mortalidad natural.

Las funciones de transición se desarrollan a partir de las variables de estado para conocer la situación de la masa en un momento futuro (GARCÍA, 1993). Estas funciones van a definir la tasa de cambio del sistema a partir de las cuales se pueden predecir posteriormente las existencias en volumen y/o biomasa de la plantación.

En este trabajo el ajuste de las funciones se llevó a cabo utilizando tres ecuaciones básicas de crecimiento formuladas por Korf (1) (LUNQVIST, 1957), Hossfeld (2) (HOSSFELD, 1822) y Bertalanffy-Richards (3) (BERTALANFFY, 1949; 1957; RICHARDS, 1959).

$$Y = a_1 \exp \left(-a_2 t^{-a_3} \right) \quad (1)$$

$$Y = \frac{a_1}{1 + a_2 t^{-a_3}} \quad (2)$$

$$Y = a_1 \left(1 - \exp \left(-a_2 t^{a_3} \right) \right) \quad (3)$$

Donde Y es la variable dependiente área basimétrica (G) o altura dominante (H_0), t es la edad de la masa y a_1 , a_2 y a_3 son los parámetros del modelo.

Posteriormente a partir de estas ecuaciones se obtuvieron tres soluciones mediante diferencias algebraicas (ADA) (BAILEY & CLUTTER, 1974) y una por diferencias algebraicas generalizadas (GADA) (CIESZEWSKI & BAILEY, 2000), por lo que finalmente se testaron un total de doce ecuaciones para cada variable de estado. La principal ventaja de los modelos GADA frente a los ADA es que se pueden obtener ecuaciones dinámicas a partir de un modelo de crecimiento base permitiendo que más de un parámetro varíe con las condiciones específicas del sitio, mientras que en las ecuaciones ADA sólo es un parámetro el que depende de la estación.

Existen problemas asociados a los errores de medición en las variables de estado al ajustar ecuaciones dinámicas, ya que cuando la variable está a la derecha de la igualdad no se considera que tenga error al contrario que si está en la parte izquierda. Esto da lugar a estimaciones de los parámetros sesgadas (MYERS, 1990). Para ello se empleó el método método de ajuste invariante en edad de referencia de “dummy variable approach” (CIESZEWSKI *et al.*, 2000). Esta metodología es aplicable en el caso de este estudio ya que existe más de una medición en cada unidad de muestreo, el número de parcelas es mayor que el número de parámetros globales de la ecuación dinámica y el conjunto de datos existente en este estudio se considera pequeño.

Por otra parte, no hubo presencia de autocorrelación en los modelos puesto que se trabajó sólo con parcelas remedidas una vez por lo tanto, no se precisó de realizar ninguna corrección.

Una vez que se seleccionaron las mejores ecuaciones de área basal y altura dominante, estas se ajustaron de forma simultánea con el fin de minimizar los errores y mejorar el modelo de crecimiento.

El ajuste de las ecuaciones se realizó con el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS (SAS INSTITUTE, 2004), empleándose para el ajuste simultáneo la regresión SUR (*Seemingly Unrelated Regression*), conocida también como mínimos cuadrados generalizados conjuntos.

2.3. Ajuste de los modelos de volumen y biomasa

Las ecuaciones de volumen y biomasa se consideran funciones de salida del modelo ya que proporcionan variables adicionales, volumen o biomasa, en función de las variables de estado.

Para el ajuste de las ecuaciones de volumen y biomasa se probaron tres modelos alométricos incluyendo la variable área basal (4), altura dominante (5) o ambas variables a la vez (6).

$$Y = a_1 \cdot G^{a_2} \quad (4)$$

$$Y = a_1 \cdot Ho^{a_2} \quad (5)$$

$$Y = a_1 \cdot G^{a_2} \cdot Ho^{a_3} \quad (6)$$

Donde Y es la variable dependiente biomasa (W) o volumen (V), G es el área basimétrica de la masa y Ho es la altura dominante del rodal.

La presencia de heterocedasticidad en los modelos fue comprobada con los gráficos de los residuos y corregida mediante regresión ponderada en el caso de que se precisara. Por otra parte, la presencia de colinealidad fue estudiada con el índice de condición (IC).

2.4. Evaluación de los modelos

Para determinar la bondad del ajuste de los modelos se empleó la Raíz del error medio cuadrático (REMC), estadístico que aporta el valor del error en las mismas unidades que la variable que se intenta explicar y el Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), el cual refleja la variabilidad total que es explicada por el modelo, teniendo en cuenta el número de parámetros empleados en el mismo. Adicionalmente se realizó un análisis gráfico de los residuos frente predichos de cada uno de los modelos ajustados así como una representación de las curvas ajustadas en este estudio sobre los datos de inventario. Finalmente los modelos fueron seleccionados en función del comportamiento gráfico, los estadísticos de bondad y su realismo biológico.

3. Resultados y discusión

3.1. Funciones de transición de área basimétrica y altura dominante

En la tabla 2 y en la gráfica 1 se presentan las funciones de transición seleccionadas para las variables área basal y altura dominante. Todos los parámetros incluidos en los modelos seleccionados resultaron significativos ($p < 0,05$), al contrario que los modelos que presentaban dos parámetros relacionados con la estación, los cuales presentaron parámetros no significativos en todos los modelos testados para ambas variables de rodal. La precisión de los modelos ajustados resultó mayor en el modelo de altura dominante que en el de área basal considerándose alta en ambos casos ($R^2_{adj} > 0,98$).

Tabla 2. Funciones de transición de área basimétrica y altura dominante.

Variable	Ecuación	REMC	R^2_{adj}
G	$G = 37,5366 \cdot \exp \left(-6,9408 \cdot t^{\frac{-\ln \left(\frac{Go}{37,5366} \right)}{-6,9408 \ln(t_0)}} \right)$	0,6040	0,9828
Ho	$Ho = Ho_0 \cdot \frac{1 + 22,5590 \cdot t_0^{-1,4475}}{1 + 22,5590 \cdot t^{-1,4475}}$	0,2364	0,9903

Donde G es el área basimétrica de la masa ($m^2 ha^{-1}$), Ho es la altura dominante del rodal (m) y t es la edad del rodal (años) y REMC se encuentra en las mismas unidades que la variable dependiente.

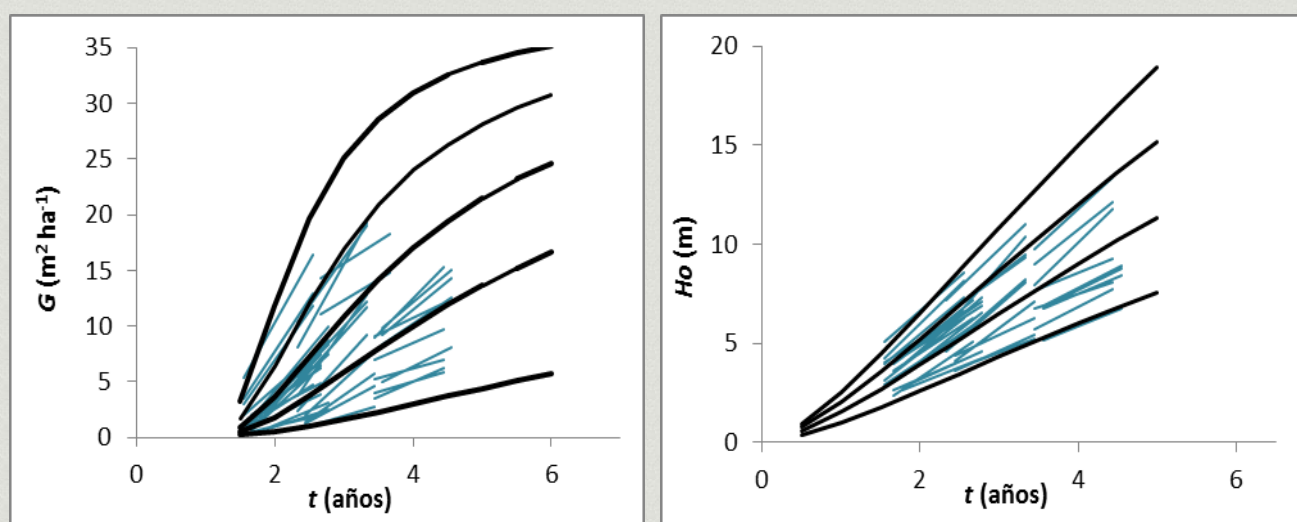


Figura 1. Modelos de crecimiento de área basimétrica y altura dominante.

3.2. Estimación del volumen y la biomasa total

Las funciones de salida de volumen y biomasa total permiten conocer el volumen total del fuste con corteza o la biomasa del rodal en un instante determinado una vez conocidas las

variables de masa área basal y altura dominante. Estas variables pueden obtenerse a través de inventarios dasométricos o de las funciones de transición elaboradas en este estudio.

En la tabla 5 se presentan los modelos de volumen y biomasa ajustados así como los resultados de sus estadísticos de ajuste. Los mejores modelos resultaron ser para las dos ecuaciones aquellos que incluían el área basal junto con la altura dominante. La precisión alcanzada en ambos modelos fue alta ($R^2_{adj} > 0,99$). Todos los parámetros incluidos en las ecuaciones resultaron significativos ($p < 0,05$) y los test realizados determinaron que no existían problemas de heterocedasticidad ni de colinealidad.

Tabla 4. Ecuaciones de volumen de madera con corteza y biomasa total.

Variable	Ecuación	REMC	R^2_{adj}
W	$W = 1,1081 \cdot G^{0,9526} \cdot Ho^{0,4089}$	1,0365	0,9973
V	$V = 1,8507 \cdot G^{1,0532} \cdot Ho^{0,4955}$	2,1909	0,9982

Donde W es la biomasa seca aérea total del rodal ($Mg\ ha^{-1}$), V es el volumen total del fuste con corteza ($m^3\ ha^{-1}$), G es el área basimétrica de la masa ($m^2\ ha^{-1}$), Ho es la altura dominante del rodal (m) y REMC se encuentra en las mismas unidades que la variable dependiente.

4. Conclusiones

- Se presentan dos funciones de transición, área basal y altura dominante, las cuales permiten predecir el desarrollo de los cultivos de corta rotación y alta densidad de *Eucalyptus nitens* en noroeste de España a una edad determinada con el fin de llevar a cabo una gestión adecuada de este tipo de plantaciones energéticas.
- Adicionalmente se ajustaron ecuaciones de volumen y biomasa total (funciones de salida) que permiten estimar la producción energética a partir de las variables de masa área basal y altura dominante, que pueden ser obtenidas a partir de inventarios o mediante las funciones de transición presentadas en este trabajo.

5. Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento al grupo ENCE, especialmente a la filial NORFOR, al personal de campo del SERIDA y CETEMAS, así como a la beca “Severo Ochoa” del Principado de Asturias de la cual la primera autora es beneficiaria.

6. Bibliografía

- BERTALANFFY, L.V.; 1949. Problems of organic growth. *Nature* 163: 156–158
- BERTALANFFY, L.V.; 1957. Quantitative laws in metabolism and growth, *Q. Rev. Biol.* 32: 217–231
- BAILEY, R.L.; CLUTTER, J.L.; 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *For. Sci.* 20 (1974) 155–159

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

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. En: Advancement in Forest Inventory and Forest Management Sciences. Proceedings of the IUFRO Seoul Conference, Forestry Research Institute of the Republic of Korea. pp.22-45

HOSSFELD, J.W.; 1822. Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten (Gotha, 4 Bd, S 310)

LUNQVIST, B.; 1957. On height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden. Medd. Fran Statens Skogforsk Band 47(2): 1–64

MYERS, R.H.; 1990. Classical and modern regression with applications, 2nd ed. Duxbury Press. Belmont, California

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

RICHARDS, F.J.; 1959. A flexible growth function for empirical use. J. Exp. Bot. 10: 290–300

SAS INSTITUTE; 2004. Inc. SAS/STAT 9.1 user's guide. SAS Institute Inc. 824 pp. Cary, North Carolina

VANCLAY, J.K.; 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford, UK.