

VARIABILIDAD INTERREGIONAL EN EL CRECIMIENTO DE LA ALTURA DOMINANTE DE *PINUS PINASTER* AIT.

Andrés Bravo-Oviedo¹, Miren del Río Gaztelurrutia¹, Margarida Tomé² y Gregorio Montero González¹

¹ CIFOR-INIA. Dep. Sistemas y Recursos Forestales. Ctra. A Coruña Km. 7,5 28040 MADRID (España). Correo electrónico: bravo@inia.es

² Instituto Superior de Agronomía. Deptº. Engenharia Florestal. Tapada de Ajuda. 1349-017 LISBOA CODEX (Portugal)

Resumen

Pinus pinaster Ait. presenta diferencias significativas en el crecimiento en altura dominante en distintas regiones naturales de su distribución. Se presentan dos posibles alternativas de modelización de la altura dominante basadas en la expansión de parámetros. La primera con variables categóricas que representen cada una de las regiones consideradas y la segunda incluyendo variables del medio. Ambas alternativas se comparan con un modelo común a todas las regiones. Los mejores resultados se obtuvieron con modelos locales que incluían variables específicas de la estación, en concreto la precipitación en otoño e invierno, la duración de la sequía y la temperatura media anual.

Palabras clave: Índice de sitio, Modelización, Pino negral, GADA

INTRODUCCIÓN

La variabilidad interregional del crecimiento de las especies forestales ha sido en los últimos años un aspecto importante en la modelización forestal. Se han utilizado diversas metodologías, como por ejemplo, la expansión de todos o de algún parámetro con variables ficticias (HUANG & TITUS, 1992; CALAMA et al., 2003; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ et al., 2005) que representen cada una de las regiones o mediante modelos mixtos (LAPPI & BAILEY, 1988; CALAMA & MONTERO, 2004). En el primer caso la región actúa como último factor de comparación, llegando al efecto de la parcela o incluso al efecto árbol en el caso de los modelos mixtos. El nivel de detalle siempre es función de las necesidades objetivas para las que se ha construido el modelo. Así un

modelo regional es suficiente para muchas aplicaciones y comparaciones, mientras que un modelo con efectos locales o individuales conlleva un entendimiento mayor del proceso en zonas sensibles, por su productividad o por su riqueza biológica.

Existen diversas alternativas para aplicar modelos en distintas regiones como, por ejemplo, el calibrado o la aplicación de modelos de procesos o de modelos híbridos. Sin embargo, otro tipo de modelos como los empíricos, son dependientes de los datos con los que se han construido, y más concretamente de las “condiciones” en las que dichos datos han sido generados. Por condiciones no ha de entenderse, en este caso, las debidas a factores operacionales en la toma de datos, sino a los factores ambientales susceptibles de cambio como, por ejemplo, el

clima. Además, la disponibilidad de datos es siempre limitada y se asumen aproximaciones regionales que pueden enmascarar una variabilidad intra-region. Por lo tanto, la modelización forestal, en su forma empírica, afronta un nuevo reto: adecuar los modelos a las condiciones cambiantes, ya no meramente regionales sino locales, en las que se generan los datos.

El pino negral (*Pinus pinaster* Ait.) presenta una gran variabilidad morfológica entre las poblaciones del interior peninsular. Así, las masas de la meseta son conocidas por su porte inclinado y tortuoso y las de Segura-Alcaraz y Sistema Central por sus buenos ejemplares. De igual modo, dentro de cada región, el patrón de crecimiento puede variar con la exposición, la altitud, etc.

El objetivo del trabajo es la identificación de relaciones entre los parámetros de la función de crecimiento y variables climáticas y edáficas locales y su implementación en los modelos empíricos, comparando los resultados obtenidos con un modelo global que considere toda el área de estudio como un común y un modelo regional para cada una de las regiones naturales consideradas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se dispone de 123 parcelas, de las cuales 107 pertenecen a la red *SEGeForS* (Sitios de Ensayo de Gestión Forestal Sostenible) del CIFOR-INIA (MONTERO et al., 2004) y 16 a la red de parcelas de experimentación del grupo de Investigación sobre Gestión Forestal Sostenible de Universidad de Valladolid (BRAVO et al., 2004) en las que se han realizado análisis de tronco en al menos dos árboles dominantes. Cada árbol se seccionó de acuerdo a su longitud total y se calculó la serie de crecimiento media

para cada parcela. En aquellas parcelas en las que no se disponía de una serie de crecimiento lo suficientemente larga (más de 50 años) se proyectó la serie con los datos de las mediciones de sucesivos inventarios realizados en las parcelas hasta 2004. De acuerdo con estudios ecológicos anteriores (NICOLÁS & GANDULLO, 1967) y manteniendo cierta continuidad geográfica y biogeoclimática de acuerdo con las regiones propuestas por ELENA-ROSSELLÓ et al. (1997) se subdividió la muestra en cuatro regiones: Meseta Norte (MN), con parcelas en Valladolid, Segovia y Sur de Soria. Sistema Central (SC), con parcelas en Madrid, Ávila y Cáceres; Sistema Ibérico (SIB), con representación en Guadalajara, Teruel y Cuenca; y Sierras de Segura y Alcaraz (SSA), con parcelas en Albacete y Jaén. La tabla 1 muestra los valores medios obtenidos para cada zona y para el conjunto del área de estudio.

Cada una de las parcelas fue caracterizada climáticamente mediante los programas GENPT y COMPLET (MANRIQUE & FERNÁNDEZ-CANCIO, 2005) que utilizan los datos de las estaciones meteorológicas circundantes. Los datos utilizados corresponden a los valores medios obtenidos en el periodo de comparación 1961-1990. Además en 65 parcelas se obtuvieron muestras de suelo mediante apertura de calicata hasta 1,25 m o roca madre realizándose análisis químicos y físicos para cada horizonte.

Se ajustó un modelo en diferencias algebraicas mediante su generalización (GADA) de acuerdo con la metodología propuesta por CIESZEWSKI & BAILEY (2000). Para ello se determinaron los parámetros específicos de cada estación y la forma en que se relacionan con una variable X, denominado factor de intensidad de crecimiento y que representa todas aquellas

Región	Número de Rodales	Edad (años)			Altura Dominante (m)		
		Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.
MN	30	64 (19,89)	33	106	15,02 (2,77)	9,21	20,49
SC	39	68 (26,67)	25	140	17,77 (4,39)	8,3	28,25
SIB	31	93 (33,25)	41	170	13,93 (3,26)	7,6	20,07
SSA	23	100 (31,62)	61	180	17,01 (2,99)	9,02	21,67
TOTAL	123	80 (32,91)	25	180	15,80 (3,90)	7,6	28,25

Tabla 1. Datos utilizados en el ajuste de los modelos de crecimiento de altura dominante, en paréntesis desviación típica

variables que influyen en el proceso de crecimiento. Despejando X y sustituyendo con condiciones iniciales H_0 y t_0 se obtiene una ecuación dinámica en la que la altura dominante se estima en función de la edad actual de la masa y dichas condiciones iniciales de la forma $Y=f(t, Y_0, t_0)$. La ecuación base utilizada fue el modelo de Hossfeld (Ec.1).

$$H = \frac{bt^c}{t^c + a} \quad (1)$$

donde H es la altura, t es la edad y a , b y c son parámetros a estimar.

Los parámetros a y b se consideraron específicos de cada estación, dejando el parámetro c global. Se consideró que el parámetro a es inversamente proporcional a X y que el parámetro b varía linealmente $b=b_1+b_2 \cdot X$, considerando que $b_2=1$. Este modelo es equivalente al propuesto por (CIESZEWSKI et al., 2006):

$$H = \frac{(b+X) \cdot t^c}{t^c + a/X} \quad (2)$$

despejando X y sustituyendo con las condiciones iniciales H_0 y t_0 obtenemos el siguiente modelo dinámico:

$$H = H_0 \frac{t^c \cdot (t_0^c \cdot R_0 + e^b)}{t_0^c \cdot (t^c \cdot R_0 + e^b)} \quad (3)$$

donde,

$$R_0 = H_0 - a + \left[(H_0 - a)^2 + 2 \cdot H_0 \cdot \frac{e^b}{t_0^c} \right]^{0.5} \quad (4)$$

Seguidamente se ajustó un modelo regional en el que se expandió mediante variables dummy de regionalización el parámetro global c , quedando el siguiente modelo regional:

$$H = H_0 \frac{t^{c_0+c_1x_1+c_2x_2+c_3x_3} \cdot (t_0^{c_0+c_1x_1+c_2x_2+c_3x_3} \cdot R_0 + e^b)}{t_0^{c_0+c_1x_1+c_2x_2+c_3x_3} \cdot (t^{c_0+c_1x_1+c_2x_2+c_3x_3} \cdot R_0 + e^b)} \quad (5)$$

donde

$$R_0 = H_0 - a + \left[(H_0 - a)^2 + 2 \cdot H_0 \cdot \frac{e^b}{t_0^{c_0+c_1x_1+c_2x_2+c_3x_3}} \right]^{0.5} \quad (6)$$

donde $x_1=1$, si la región es la Meseta Norte, $x_2=1$, si la región es el Sistema Central y $x_3=1$, si la región es el Sistema Ibérico, siendo cero en el resto de casos.

Una vez determinada la necesidad o no, de un modelo regional frente al modelo global median-

te un test de homogeneidad de parámetros, se estudia la idoneidad de incluir variables locales en los modelos. CIESZEWSKI (2001) establece tres metodologías para obtener ecuaciones dinámicas de crecimiento. Uno de esos métodos consiste en modificar la ecuación base, a partir de la cual se obtiene la ecuación dinámica. Por lo tanto, tomando como ecuación base el mismo modelo utilizado en el ajuste de los modelos global y regional se modificó considerando diversas hipótesis de crecimiento en función de variables climáticas y edáficas específicas de cada estación.

Partiendo del modelo general equivalente al modelo de Hossfeld, y siguiendo la notación de CIESZEWSKI (2001) se tiene que:

$$H = t^{v+\delta} \left(\eta + \alpha S^\zeta \right) \left(t^\delta + \frac{\gamma'}{S^\zeta} \right)^{-1} \quad (7)$$

donde S es una variable indicadora de la productividad de la estación, t es la edad y el resto son parámetros a obtener. Al despejar S , tenemos que

$$S = \left[0.5\alpha^{-1} \left[Z_0 \pm \left(Z_0 + \frac{2\kappa H_0}{t_0^{v+\delta}} \right)^{0.5} \right] \right]^{1/\zeta} \quad (8)$$

donde

$$\alpha \neq 0 \neq \gamma', \quad Z_0 = \pm \frac{H_0}{t_0^v} \pm \eta \quad \text{y} \quad \kappa = 2\alpha\gamma' = 2\alpha e^\gamma,$$

sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7) se obtiene el siguiente modelo dinámico:

$$H = H_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{v+\delta} \left(t_0^\delta R + \kappa \right) \left(t^\delta R + \kappa \right)^{-1} \quad (9)$$

donde

$$R = Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + \frac{2\kappa H_0}{t_0^{v+\delta}}}, \quad \text{siendo} \quad Z_0 = \frac{H_0}{t_0^v} - \eta,$$

que es la solución positiva más probable.

La selección de variables climáticas y edáficas se realizó mediante un análisis factorial de componentes principales. Una vez determinadas las variables se evaluó su posible efecto en el crecimiento en altura dominante mediante la expansión de los parámetros α , η y δ .

Tanto el modelo global, como el regional y el climático se evalúan mediante técnicas de remuestreo, en las que se omite una serie de crecimiento, se calculan los parámetros de las funciones y se obtiene un valor predicho para la

serie omitida. Este valor se utiliza en el cálculo del error medio (MRES) y absoluto (AMRES) de predicción, estimado como la media de las diferencias medias de valores observados y predichos de la *i*-ésima serie de crecimiento, la raíz del error medio cuadrático de predicción de la *i*-ésima serie de crecimiento y la eficiencia del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los ajustes de los modelos se presentan en la tabla 2. De acuerdo con el test de homogeneidad de parámetros es necesario modelos separados para cada una de las regiones

(Tabla 2), comparando todas las regiones a la vez o de tres en tres. Cuando se comparan de dos en dos se observa como cada vez que se compara las masas del Sistema Ibérico con el resto de masas un único modelo sería suficiente, pero cuando se comparan el resto de masas se necesita un modelo para cada una de ellas.

En la figura 1 se muestra el análisis factorial de componentes principales con variables climáticas y con variables edáficas. Desde el punto de vista de las variables climáticas el Sistema Central y la Meseta Norte poseen mayor variabilidad interna. Las variables climáticas que más peso tienen en los dos primeros factores son la duración de la sequía en meses, la temperatura media anual y las precipitaciones de otoño e

Modelo	Parámetros								MSE	RMSE	Adj-R ²
	a ₀	b/a ₁	b ₀	b ₁	c	c ₁	c ₂	c ₃			
MG	14,45 (1,72)	8,42 (0,12)			1,34 (0,03)				0,400	0,632	98,73
MR	15,34 (1,34)	8,49 (0,12)			1,53 (0,052)	-0,48 (0,066)	-0,17 (0,066)	0,23 (0,086)	0,390	0,626	98,75
A1	0,0863 (0,00326)		1,31 (0,0265)	-0,24 (0,027)	7,77 (0,989)				0,393	0,627	98,75
A2	0,0253 (0,000691)		1,31 (0,0258)	-0,27 (0,026)	23,07 (2,699)				0,389	0,624	98,76
M1	2606,59 (810,3)	15,87 (1,062)	1,34 (0,030)	0,23 (0,060)	0,002 (0,000)				0,373	0,611	98,81
M2	707,59 (246,2)	15,67 (1,089)	1,34 (0,030)	0,23 (0,060)	0,006 (0,000)				0,374	0,612	98,81

Tabla 1. Estadísticos de ajuste para cada uno de los modelos ensayados

Comparación	<i>L</i>	p-valor	<i>F</i>	<i>F</i> _{crit}
Todas las regiones	27,06	< 0,0001	8,08	2,61
MN-SC-SI	34,18	< 0,0001	15,36	3,01
MN-SC-SA	14,7	< 0,0001	6,55	3,01
MN-SI-SA	11,05	< 0,0001	4,93	3,01
SC-SI-SA	15,11	< 0,0001	6,76	3,01
MN-SC	38,57	< 0,0001	34,88	3,86
MN-SI	3,87	0,049	3,42	3,86
MN-SA	9,97	< 0,0001	8,89	3,86
SC-SI	1,85	0,17	1,63	3,86
SC-SA	11,33	0,000763	10,1	3,86
SI-SA	2,96	0,0854	2,64	3,86

Tabla 2. Test de Lakkis-Jones (*L*) y test de homogeneidad de parámetros. Valores en negrita indican que un único modelo es necesario

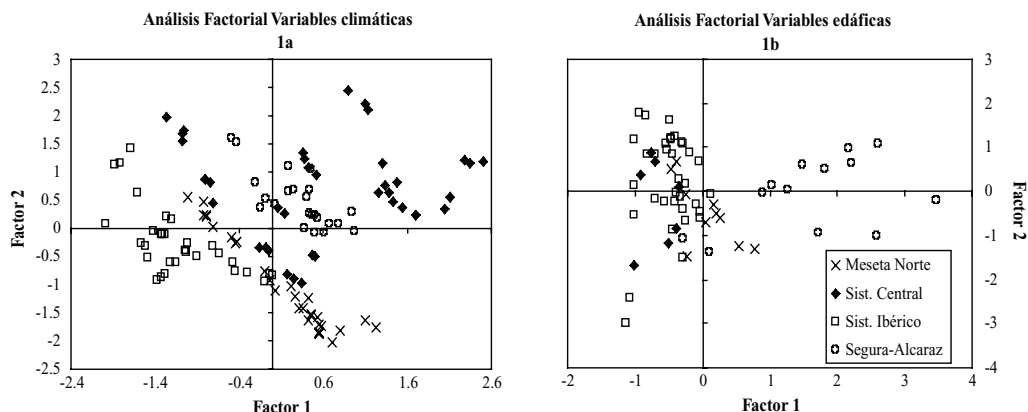


Figura 1. Análisis Factorial de componentes principales. 1a) Variables climáticas, 1b) Variables edáficas

invierno. Mientras que desde el punto de vista edáfico, solamente se diferenciaron las Sierras de Segura y Alcaraz, por un mayor contenido en calcio y magnesio y presencia de carbonatos en los perfiles muestreados. Al no disponer de datos de suelo en todas las parcelas se incluyó el origen geológico en los modelos específicos de cada estación mediante una variable ficticia que diferencia el origen dolomítico de la masa.

Una vez determinado que existen diferencias entre y dentro de las regiones, tanto desde el punto de vista climático como edáfico se establecen hipótesis sobre la manera en el que el clima y el suelo actúan en el crecimiento, basado en un comportamiento biológico razonable. Los mejores resultados se obtuvieron al expandir los parámetros de la ec 7 de la siguiente forma:

$$A1 \left\{ \begin{array}{l} \eta = a_0 \cdot PR \quad \delta = b_0 + b_1 \cdot DOL \\ \gamma = \exp\left(c \cdot \frac{\sqrt{T}}{DL+1}\right) \quad \kappa = 2\alpha\gamma' = 2\alpha e^{\gamma} \quad \alpha = 0.5 \end{array} \right.$$

$$A2 \left\{ \begin{array}{l} \eta = a_0 \cdot PR \cdot \sqrt{T} \quad \delta = b_0 + b_1 \cdot DOL \\ \gamma = \exp\left(\frac{c}{DL+1}\right) \quad \alpha = 0.5 \end{array} \right.$$

donde PR es la suma de las precipitaciones de otoño e invierno en mm, T es la temperatura media anual en °C, DL es la duración de la sequía en meses, DOL es una variable ficticia que toma el valor 1 cuando el origen es dolomítico y 0 en caso contrario y a_0 , b_0 , b_1 y c son parámetros a estimar.

Los modelos climáticos A1 y A2 indican que el clima tiene efecto aditivo en el crecimiento en altura dominante al expandir el parámetro η , mientras que M1 y M2 indican efecto multiplicativo al expandir el parámetro α en la ecuación 7. En la tabla 1 se muestran los estadísticos de los cuatro modelos climáticos según la expansión A1, A2, M1 y M2.

La tabla 3 muestra los estadísticos de evaluación de los modelos y se observa como los

$$M1 \left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a_0}{DL+1} \right) \right] \quad \gamma = c \cdot PR \cdot \sqrt{T} \\ \kappa = 2\alpha\gamma', \text{ donde } \gamma' = e^{\gamma} \quad \delta = b_0 + b_1 \cdot DOL \end{array} \right.$$

$$M2 \left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{1}{2} \left[\left(a_0 \cdot \frac{\sqrt{T}}{DL+1} \right) \right] \quad \gamma = c \cdot PR \\ \kappa = 2\alpha\gamma', \text{ donde } \gamma' = e^{\gamma} \quad \delta = b_0 + b_1 \cdot DOL \end{array} \right.$$

ACP variables fisio-climáticas			ACP variables edáficas		
Variable	Factor1	Factor2	Variable	Factor1	Factor2
Altitud	-0,87	0,04	Tierra fina	-0,02	-0,26
Latitud	-0,24	-0,36	Elementos gruesos	-0,06	0,21
Pendiente	0,15	0,54	Arena	-0,15	-0,86
Orientación	-0,05	0,24	Arcilla	0,42	0,83
Insolación	-0,11	0,10	CCC	0,45	0,76
Precipitación anual	0,23	0,95	CIL	-0,22	0,38
Precipitación de invierno	0,55	0,78	pH	0,85	-0,01
Precipitación de verano	-0,84	-0,06	Capacidad de retención de agua	-0,15	0,30
Precipitación de otoño	0,35	0,85	Humedad equivalente	0,29	0,83
Temperatura media anual	0,93	0,25	Materia orgánica	0,33	0,03
Temperatura media mensual más baja	0,89	0,31	Calcio	0,81	0,33
Temperatura media mensual más alta	0,86	0,31	Sodio	-0,03	0,32
Temperatura media de las mínimas del mes más frío	0,84	0,31	Potasio	0,73	0,33
Mínima absoluta	0,82	0,43	Fósforo	-0,22	-0,91
Temperatura media de las máximas del mes más cálido	0,90	0,19	Magnesio	0,64	0,00
Máxima Absoluta	0,67	-0,02	Nitrogeno	0,46	0,17
Evapotranspiración de Invierno	0,87	0,31	Carbonatos	0,82	0,28
Evapotranspiración de Primavera	0,95	0,07	Caliza activa	0,80	0,38
Evapotranspiración de Verano	0,86	0,29	Conductividad	0,82	0,20
Evapotranspiración de Otoño	0,86	0,29	Capacidad de intercambio catiónico	0,69	0,25
Meses con helada	0,09	0,03	Tasa de saturación	0,75	0,27
Duración de la sequía	0,93	0,08			
Varianza explicada por cada factor	11,98	3,65	Varianza explicada por cada factor	6,28	4,62
% Varianza explicada	0,58	0,18	% Varianza explicada	0,35	0,26
% Varianza acumulada explicada	0,58	0,76	% Varianza acumulada explicada	0,35	0,62

Tabla 3. Peso de las variables fisio-climáticas y edáficas en las dos primeras componentes de sus respectivos análisis

modelos climáticos mejoran ligeramente las estimaciones de los modelos global y regional. No obstante, cuando se tiene en cuenta las edades a las que se proyecta el crecimiento se observa una mejora notable al utilizar los modelos climáticos. Además, los modelos de tipo multiplicativo presentan una mayor eficiencia en las edades iniciales, pasando el efecto del clima a ser aditivo en edades posteriores (Figura 2).

CIESZEWSKI et al. (1998) establecen dos condiciones para que los modelos sean invariantes respecto a la edad índice, que el modelo sea alge-

braico y que el método de ajuste de los parámetros sea también invariante. Los modelos presentados en este trabajo cumplen las dos condiciones. La flexibilidad de los modelos GADA se pone de manifiesto cuando se comparan los modelos regional y global, puesto que apenas hay diferencias entre ambos. Los modelos climáticos son capaces de corregir cierta heterogeneidad climática intra-regional (sobre todo en el Sistema Central y la Meseta Norte). Sin embargo, en una región homogénea respecto al clima, como las Sierra de Segura y Alcaraz, ambos modelos son similares.

Modelo	Eficiencia	AMRES	MRES	% MRES	% AMRES	RMSE
MG	96,7	0,71	-0,15	-2,13	8,16	1,07
MR	96,8	0,71	-0,18	-2,53	8,14	1,07
A1	97,3	0,67	-0,23	-2,93	7,68	0,99
A2	97,3	0,66	-0,23	-2,88	7,49	0,97
M1	97,1	0,67	-0,10	-1,68	7,68	0,88
M2	97,1	0,67	-0,11	-1,71	7,70	1,01

Tabla 4. Estadísticos de validación para cada uno de los modelos

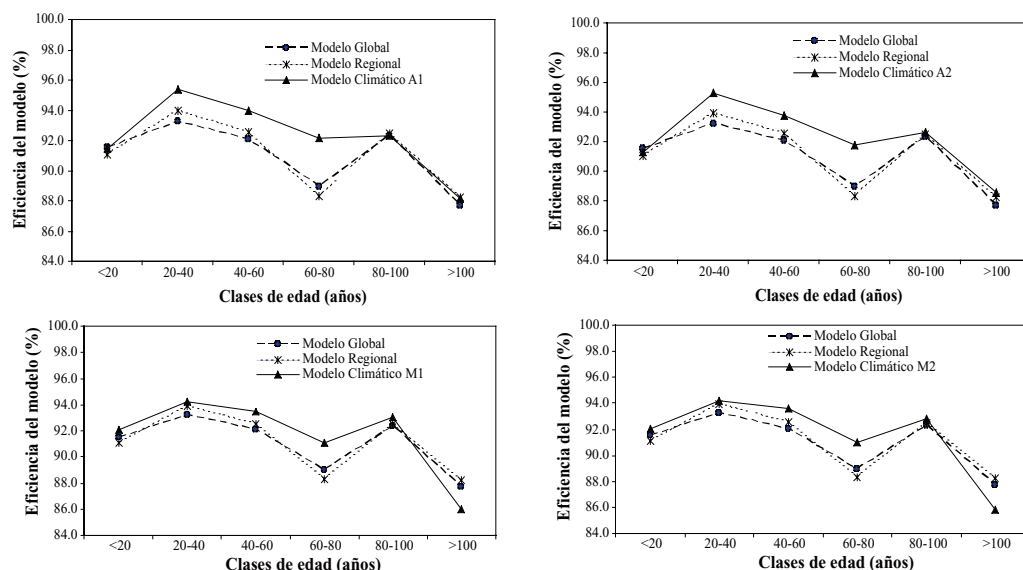


Figura 2. Eficiencia de los modelos según clases de edad

La determinación de subregiones dentro de las regiones consideradas mediante la aproximación de variables ficticias choca con la disponibilidad de datos. La solución propuesta aquí es la de incluir variables propias de cada estación, tanto de clima como de origen geológico, que influyan en la regionalización. La cuestión es si los modelos así formulados pueden ser considerados como locales y si tal grado de detalle es necesario. Desde el punto de vista de la gestión a nivel supra monte una única ecuación, o como mucho regional, sería suficiente. Sin embargo, cuando el recurso es de gran valor, por su producción o por su rareza, un modelo que refleje bien el patrón de crecimiento en función de las condiciones del medio es más apropiado. Por otra parte, aunque el

origen empírico del modelo impide sacar conclusiones sobre los procesos de crecimiento, si la validación del comportamiento del modelo climático con el efecto probable que el cambio climático tiene sobre la vegetación es positiva, el modelo propuesto sería de gran interés para la gestión adaptativa, ya que se podría evaluar las consecuencias del cambio climático sobre la productividad de la estación a medio plazo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación OT03-002 y AGL2004-007094-C02-02.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; RUÍZ-GONZÁLEZ, A.D.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. & BARRIO ANTA, M.; 2005. Ecoregional site index models for *Pinus pinaster* in Galicia (northwestern Spain). *Ann. For. Sci.* 62: 115-127.
- BRAVO, F.; ORDÓÑEZ, C.; LIZARRALDE, I.; BRAVO-OVIEDO, A.; GUERRA, B.; PESO, C.; DOMÍNGUEZ, M. Y OSORIO, L.F.; 2004. Red de parcelas y experimentos del grupo de investigación sobre gestión forestal sostenible de la ETS de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid). *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For* 18: 237-242.
- CALAMA, R.; CAÑADAS, N. Y MONTERO, G.; 2003. Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Ann. For. Sci.* 60: 259-269.
- CALAMA, R. & MONTERO, G.; 2004. Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. *Can. J. For. Res.* 34: 150-163.
- CIESZEWSKI, C.J.; 2001. Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. *Can. J. For. Res.* 31: 165-173.
- CIESZEWSKI, C.J. & BAILEY, R.L.; 2000. Generalized Algebraic Difference approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.* 46: 116-126.
- CIESZEWSKI, C.J.; BAILEY, R.L.; BORDERS, B.E.; BRISTER, G.H. & SHIVER, B.D.; 1998. Base-age invariance and inventory projections. In: *Integrated Tools Proceedings*: 481-493. Boise. Idaho.
- CIESZEWSKI, C.J.; ZASADA, M. & STRUB, M.; 2006. Analysis of different base models and methods of site model derivation for Scots pine. *For. Sci.* 52: 187-197.
- ELENA-ROSSELLÓ, R.; CASTEJÓN, M.; SÁNCHEZ, F.; TELLA, G.; SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; GONZÁLEZ-ADRADOS, J.R. Y ALLUÉ-ANDRADE, J.L.; 1997. *Clasificación Biogeoclimática de España peninsular y Balear - Atlas Clateres*. Secretaría General Técnica. INIA. Madrid.
- HUANG, S. & TITUS, S.J.; 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Can. J. For. Res.* 1297-1304.
- LAPPI, J. & BAILEY, R.L.; 1988. A height prediction model with random stand and tree parameters: an alternative to traditional site index methods. *For. Sci.* 34: 907-927.
- MANRIQUE, E. Y FERNÁNDEZ-CANCIO, A.; 2005. Sistema informático para la generación de datos climáticos y fitoclimáticos. En: S.E.C.F.-Gobierno de Aragón (eds.), *Libro de Resúmenes, Conferencias y Ponencias, IV Congreso Forestal Español*. CD-Rom. Imprenta Repes, S.C. Zaragoza.
- MONTERO, G.; MADRIGAL, G.; RUIZ-PEINADO, R. Y BACHILLER, A.; 2004. Red de parcelas experimentales permanentes del CIFOR-INIA. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 18: 229-236.
- NICOLÁS, A. Y GANDULLO, J.M.; 1967. *Ecología de los pinares Españoles I. Pinus pinaster* Ait. Ministerio de Agricultura. Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial. I.F.I.E. Madrid.