

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD INTERREGIONAL EN LOS MODELOS DE CRECIMIENTO EN ALTURA DOMINANTE Y CALIDAD DE ESTACIÓN DE *PINUS NIGRA* ARN. EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

Darío Martín Benito, Miren del Río Gaztelurrutia e Isabel Cañellas Rey de Viñas

Departamento Sistemas y Recursos Forestales. CIFOR-INIA. Crta. La Coruña km 7,5. 28040-Madrid (España). Correo electrónico: dmartin@inia.es

Resumen

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo de crecimiento en altura dominante invariante respecto de la edad de referencia para *Pinus nigra* Arn. Hemos aplicado modelos en diferencias algebraicas generalizadas (GADA). Se ha estudiado la variabilidad existente entre los modelos de calidad de estación de las tres regiones de las que proceden los datos de parcelas permanentes del INIA (Sierras Béticas, Sistema Ibérico Oriental y Sierras Costeras, y Serranía de Cuenca-Alta Alcarria). Basándonos en distintos criterios de ajuste, en la forma de las curvas y en su comportamiento frente a un conjunto de datos de validación, el modelo en forma GADA basado en la ecuación de crecimiento de KORF (1939) es el que mejor comportamiento presenta para describir y estimar el crecimiento de la altura dominante de la especie. Así mismo se ha concluido que es posible emplear una sola función para todas las regiones analizadas. Un modelo único presenta la ventaja de no emplear distintos parámetros para cada región con lo que se facilita la comparación de productividad entre rodales de diferentes regiones.

Palabras clave:

INTRODUCCIÓN

Los modelos de crecimiento en altura dominante y de calidad de estación permiten estimar la productividad de las masas forestales y establecer los tratamientos selvícolas más adecuados para la optimización de sus recursos. De entre los distintos métodos para la construcción de curvas de calidad de estación, el método de ecuaciones en diferencias algebraicas tiene las ventajas de que se pueden emplear series de tiempo cortas, procedentes de análisis de troncos, de parcelas permanentes o de intervalo. El concepto de independencia de la edad de referencia introducido

por BAILEY Y CLUTTER (1974), incluye la estimación de los parámetros del modelo empleando un método independiente de la edad de referencia, lo que permite utilizar todos los datos disponibles. Así mismo proporciona la característica de que la altura a una edad determinada puede ser predicha a partir de cualquier otro par de edad-altura dentro de la misma curva, y de que la altura predicha siempre será la misma independientemente del punto inicial empleado. Para obtener modelos de calidad de estación con las características de asíntota variable y polimorfismo más de un parámetro ha de ser función del índice de sitio. Para ello, para el desarrollo de

modelos de crecimiento en altura dominante se emplea generalmente la metodología de ecuaciones en diferencias algebraicas (GADA, *Generalized Algebraic Difference Approach*) (CIESZEWSKI & BAILEY, 2000).

Pinus nigra Arn. *salzmannii* ocupa en la Península Ibérica más de 1,4 millones de hectáreas, correspondiendo más de 350.000 ha a masas naturales (GUTIÉRREZ-OLIVA et al., 2006). La mayor parte de estas masas están distribuidas por la mitad oriental de la península, desarrollándose por lo general sobre sustratos calizos (SÁNCHEZ et al., 1990). Las poblaciones naturales de *Pinus nigra* de la península pueden dividirse en cuatro regiones (ELENA Y SÁNCHEZ, 1991), de las cuales tres son analizadas en este trabajo.

En los trabajos anteriores sobre calidad de estación de *Pinus nigra* (PITA, 1965; GÓMEZ, 1996) se han empleado datos y metodologías de diferente naturaleza tanto en la función elegida como en los análisis estadísticos y edades de referencia. Esto dificulta la comparación de las curvas obtenidas e impide ver con claridad si las diferencias en los patrones de crecimiento se deben a variabilidad interregional o son consecuencia de los diferentes criterios de construcción.

El objetivo principal del presente trabajo es desarrollar un modelo de crecimiento en altura dominante invariante respecto de la edad de referencia para *Pinus nigra*, basado en metodologías GADA, así como comparar la variabilidad existente entre las regiones donde existen masas naturales de *Pinus nigra*. Tras este primer paso, se pretende seleccionar, si es posible, una única función que pueda describir y predecir el crecimiento en altura dominante de la especie en estas regiones.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para el ajuste de los modelos se emplearon datos de análisis de troncos de *Pinus nigra* procedentes de las 50 parcelas permanentes del INIA establecidas entre los años 1963 y 1964 en tres regiones: 1) Sierras Béticas, 2) Serranía de Cuenca-Alta Alcarria y 3) Sistema Ibérico Oriental y Sierras Costeras

En los alrededores de cada una de ellas se apearon dos árboles dominantes (ASSMAN, 1970)

el mismo año de su instalación, salvo en Teruel (Región 3) donde fueron apeados años más tarde. Se han estudiado un total de 102 análisis de troncos. El hecho de que un árbol sea dominante en un determinado momento no garantiza que siempre lo haya sido. Por este motivo fueron rechazados todos aquellos perfiles de crecimiento que reflejasen algún periodo de supresión, siendo finalmente seleccionados 94 árboles.

En cada árbol apeado se midió la altura total y el fuste fue dividido en secciones de las que se tomaron rodajas a distintas distancias a partir de la rodaja basal a 0,10 m.

La comparación de modelos en base a un conjunto de datos distinto del empleado en la construcción de los mismos es importante, ya que un buen ajuste no refleja necesariamente una buena la calidad de predicción. Para esta validación se utilizaron los datos de alturas dominantes (H) de los ocho inventarios de las 50 parcelas permanentes entre 1964 y 2006 (intervalos entre inventarios de 5 a 9 años).

Estas parcelas permanentes tienen un número variable de árboles y unas superficies entre 650 m² y 2500 m². En cada inventario se midieron los diámetros normales y las alturas de 40 árboles por parcela, 30 de ellos distribuidos proporcionalmente a las clases diamétricas y completando las mediciones de alturas de tal forma que siempre se midiera un número de árboles dominantes por parcela en proporción de 100 por hectárea. Se consideró como altura dominante la altura media de los 100 árboles más gruesos por hectárea (ASSMAN, 1970).

De entre las ecuaciones de crecimiento citadas por ZEIDE (1993) se eligieron cuatro para ser empleadas con GADA (Tabla 1). Las funciones estudiadas fueron ajustadas independientemente a los datos de cada una de las tres regiones mediante el empleo del procedimiento PROC MODEL de SAS con el método iterativo Marquardt y el método de las variables *dummy* propuesta por CIESZEWSKI et al. (2000). Para evitar los problemas que origina la autocorrelación en las series de datos longitudinales se aplicó la expansión del error según GOELZ & BURK (1992) teniendo en cuenta la autocorrelación de primer orden.

La comparación de los modelos estudiados se llevó a cabo mediante criterios de ajuste

Ecuación base	Parámetros relacionados con el sitio	Solución de X	Ecuación dinámica
HOSFELD IV (1822) Citada en PESCHEL (1938): $y = \frac{t^c}{b + at^c}$	a = X b = b ₁ X	$X_0 = \frac{t_1^c / y_1}{b_1 + t_1^c}$	$y_2 = \frac{t_2^c}{b_1 X_0 + X_0 t_2^c}$
LUNDVQUIST-KORF (1939) $y = a \cdot \exp(-b \cdot t^{-c})$	a = exp(X) b = b ₁ /X	$X_0 = 0.5 \cdot (\ln(y_1) + F_0)$ $F_0 = \sqrt{((\ln(y_1))^2 + 4b_1 t_1^{-c})}$	$y_2 = \exp(X_0) \cdot \exp(-(b_1 / X_0) \cdot t_2^{-c})$
BERTALANFFY (1949, 1957); RICHARDS (1959): $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot t))^{-c}$	a = exp(X) c = c ₁ + (1/X) a = exp(X) c = c ₂ /X	$X_0 = 0.5 \cdot (\ln(y_1) - c_1 F_0 + \sqrt{(c_1 F_0 - \ln(y_1))^2 - 4F_0})$ $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_1))$ $X_0 = 0.5 \cdot (\ln(y_1) + \sqrt{(\ln(y_1))^2 - 4c_2 F_0})$ $F_0 = \ln(1 - \exp(-bt_1))$	$y_2 = \exp(X_0) \cdot (1 - \exp(-bt_2))^{(c_1 + (1/X_0))}$ $y_2 = \exp(X_0) \cdot (1 - \exp(-bt_2))^{(c_2/X_0)}$

Tabla 1. Ecuaciones base y dinámicas empleadas para modelizar el crecimiento en altura dominante de *Pinus nigra*

como el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación en la fase de estimación (R²) o eficiencia (EF) en la fase de validación, el valor medio del sesgo y las diferencias en el criterio de información de Akaike (AICd) (BURNHAM & ANDERSON, 1997). Además se tuvo en cuenta que la forma de las curvas obtenidas mostrara un comportamiento biológico. Para la validación, se analizó el comportamiento de los modelos sobre los datos de *H* de las parcelas permanentes, empleándose los mismos estadísticos que en el primer caso.

Una vez elegido el modelo se compararon las pautas de crecimiento de las regiones mediante el test de la χ^2 propuesto por Lakkis & Jones (KHATTREE & NAIK, 1999), que detecta la homogeneidad simultánea de parámetros. En este test se requiere el ajuste de un modelo reducido (misos vectores de parámetros para las tres regiones) y uno completo (un vector para cada región).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo M2 basado en la fórmula de LUNDVQUIST-KORF (1939) fue el que mejor comportamiento general mostró tanto en ajuste como en validación, con valores bajos RMSE y altos de R² (Tablas 2 y 3). Se recomienda por lo

tanto emplear esta ecuación para modelizar el crecimiento en *H* de *Pinus nigra*.

Las regiones 1 y 2 mostraron un comportamiento similar en el crecimiento de *H* mientras la región 3 presenta un comportamiento diferente (Figura 1). Los resultados del test de Lakkis & Jones señalaron como única diferencia significativa la existente entre las zonas 1 y 3. Para este grupo de comparación (zona 3 frente a las zonas 1 y 2 juntas) el estadístico *L* tuvo un valor muy inferior al del resto de los grupos. No obstante, asumiendo la igualdad de parámetros para las tres regiones, el modelo reducido presentó valores de *L* (0.5354 [*p*=0.8699 para -2·log(*L*)] indicando que las diferencias entre tomar las tres zonas por separado o las tres zonas juntas no eran significativas. Esto permitiría emplear un único modelo para todas las regiones. Aplicando el M2 con esta hipótesis al conjunto de datos de validación, el modelo mostró un buen comportamiento (Tabla 3). Este modelo M2 reducido produjo curvas que reflejaban correctamente los datos de crecimiento en *H* utilizados tanto en la construcción como en la validación de los modelos (Figura 2).

Los mayores valores del error medio y los menores de la eficiencia se obtienen al utilizar una edad para la predicción menor de 20 años (Figura 3). No se observaron en este tipo de error diferencias entre los distintos grupos de regiones.

Región	Modelo	Parámetro	Estimación	SE	t	p > t	RMSE	Adj R ²	AICrel	(H ₃₅₀)
1	M1	b1	309,884	66,159	4,68	<0,0001	1,0146	0,9768	18,68	49,0
		c	1,258	0,073	17,22	<0,0001				
	M2	b1	39,615	2,576	15,38	<0,0001	0,9638	0,9791	0,00	49,9
		c	0,397	0,057	6,92	<0,0001				
M3	c1	0,907	0,079	11,48	<0,0001	1,0155	0,9768	19,02	45,5	
	b	0,012	0,001	8,82	<0,0001					
M4	c2	4,168	0,254	16,44	<0,0001	0,9928	0,9778	10,80	42,8	
	b	0,012	0,001	9,47	<0,0001					
2	M1	b1	874,353	270,700	3,23	0,0014	0,4112	0,9939	10,00	81,7
		c	1,195	0,085	14,09	<0,0001				
	M2	b1	64,266	15,292	4,2	<0,0001	0,4026	0,9941	0,00	70,4
		c	0,223	0,059	3,81	0,0002				
M3	c1	0,926	0,083	11,12	<0,0001	0,4128	0,9938	11,88	71,5	
	b	0,005	0,002	2,77	0,006					
M4	c2	4,000	0,269	14,89	<0,0001	0,4165	0,9937	16,09	53,1	
	b	0,007	0,002	4,08	<0,0001					
3	M1	b1	411,830	53,740	7,66	<0,0001	0,7054	0,9853	8,21	52,0
		c	1,294	0,047	27,29	<0,0001				
	M2	b1	47,200	1,880	25,11	<0,0001	0,695	0,9857	0,00	56,0
		c	0,374	0,043	8,75	<0,0001				
M3	c1	1,008	0,054	18,66	<0,0001	0,7062	0,9853	8,86	47,3	
	b	0,012	0,001	11,94	<0,0001					
M4	c2	4,567	0,176	25,91	<0,0001	0,7023	0,9854	5,79	44,6	
	b	0,012	0,001	12,67	<0,0001					
Todas las regiones (modelos reducidos)	M1	b1	422,752	49,264	8,58	<0,0001	0,7437	0,9843	96,77	56,6
		c	1,246	0,042	29,89	<0,0001				
	M2	b1	43,735	1,175	37,23	<0,0001	0,6938	0,9863	0,00	53,4
		c	0,380	0,027	13,99	<0,0001				
M3	c1	0,967	0,040	24,04	<0,0001	0,7640	0,9834	134,24	49,7	
	b	0,011	0,001	15,59	<0,0001					
M4	c2	4,368	0,127	34,5	<0,0001	0,7592	0,9836	125,59	45,2	
	b	0,012	0,001	17,84	<0,0001					

Tabla 2. Estimación de parámetros y estadísticos de bondad de ajuste para los modelos propuestos. Altura dominante (H₃₅₀) se calculó para la calidad de estación 1 a los 350 años, en lugar de la asíntota como estimación del crecimiento máximo. SE= error estándar; RMSE=error medio cuadrático; AICd= diferencias en el criterio de información de Akaike

Según la longitud del intervalo de predicción, se vio como los intervalos más largos producían sesgos mayores (aunque menores de 25 cm en todos los casos) y menores eficiencias (Figura 3). Esto indica una menor precisión en las predicciones al utilizar estos modelos con largos intervalos de predicción o a edades tempranas de la masa, debido probablemente a que en las edades jóvenes el crecimiento en H está condicionado por otros factores (e.g. OLIVER & LARSON, 1996).

Finalmente, se seleccionó el modelo reducido para las tres regiones de la función de LUNDQUIST-KORF (1939) en la forma GADA:

$$H = \exp(X_0) \cdot \exp\left(-\frac{43.73549}{X_0} \cdot t^{-0.38048}\right) \text{ donde}$$

$$X_0 = 0.5 \cdot (\ln H_0 + \sqrt{((\ln H_0)^2 + 4 \cdot 43.73549 \cdot t_0^{-0.38048})})$$

El hecho de utilizar un solo modelo facilita la comparación de productividad entre parcelas de diferentes regiones. Así mismo, se facilita la transferencia de experiencias selvícolas de unas regiones a otras para parcelas de calidades similares y el desarrollo de modelos de crecimiento, competencia y producción para varias regiones agrupadas (CALAMA et al., 2003).

Región	Modelo	N	RMSE (m)	Sesgo (m)	EF
1	M1	111	0,6303	0,0395	0,98
	M2	111	0,6003	0,1322	0,98
	M3	111	0,6446	0,0310	0,98
	M4	111	0,6073	0,0691	0,98
2	M1	129	1,0696	-0,1798	0,94
	M2	129	0,8482	-0,1064	0,96
	M3	129	1,0836	-0,1905	0,94
	M4	129	0,9911	-0,1519	0,95
3	M1	48	1,0477	-0,2124	0,79
	M2	48	0,8010	-0,1026	0,88
	M3	48	0,9599	-0,1741	0,83
	M4	48	0,7598	-0,0634	0,89
Todas las regiones (modelos reducidos)	M1	288	0,9798	-0,1461	0,96
	M2	288	0,6781	0,0036	0,98
	M3	288	0,9293	-0,1210	0,96
	M4	288	0,8055	-0,0602	0,97

Tabla 3. Estadísticos de validación de los modelos. RMSE=error medio cuadrático; EF= eficiencia

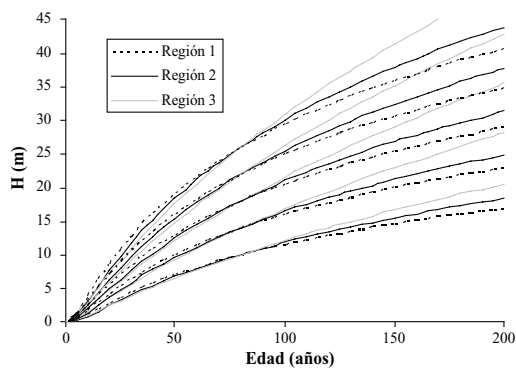
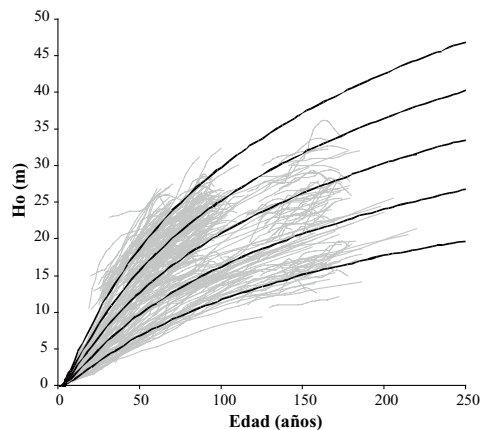


Figura 1. Curvas de calidad de estación por regiones para *Pinus nigra* usando la función de LUNDQVIST-KORF (1939) mediante parametrización GADA, para 26, 22, 18, 14 y 10 m de H a los 80 años

Figura 2. Curvas de índice de sitio generadas con el modelo M2, superpuestas a los datos de análisis de troncos (ajuste) y parcelas permanentes (validación) para 26, 22, 18, 14 y 10 m de H a los 80 años



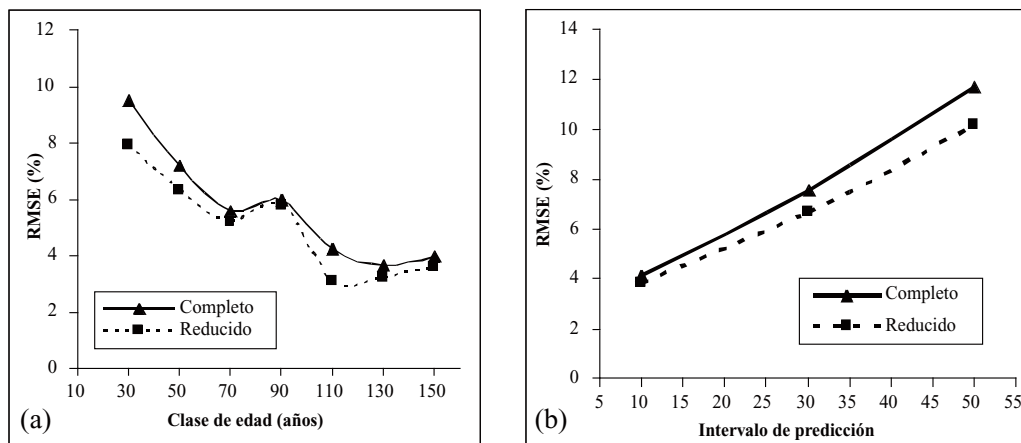


Figura 3. Error medio cuadrático (RMSE) por clase de edad e intervalo de predicción obtenidos con el modelo M2 (completo y reducido) y los datos de validación (parcelas permanentes)

BIBLIOGRAFÍA

- ASSMAN, E.; 1970. *The principles of forest yield study*. English Edition. Pergamon Press Ltd. Oxford.
- BAILEY, R.L. & CLUTTER, J.L.; 1974. Base-age invariant polymorphic site curve. *For. Sci.* 20: 155-159.
- BURNHAM, K.P. & ANDERSON, D.R.; 1998. *Model selection and inference: a practical information-theoretic approach*. Springer-Verlag. New York.
- CALAMA, R.; CAÑADAS, N. & 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.
- CIESZEWSKI, C.J. & BAILEY, R.L.; 2000. Generalized Algebraic Difference Approach: a new methodology for derivation of biologically based dynamic site equations. *For. Sci.* 46: 116-126.
- CIESZEWSKI C.J.; 2004. *GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes form Richards, Weibull, and other exponential functions*. PMRC Tecnical Report. Daniel B. Warnell School of Forest Resources. University of Georgia. Athens.
- CIESZEWSKI, C.J.; HARRISON, M. & MARTIN, S.W.; 2000. *Practical methods for estimating non-biased parameters in self-referencing growth and yield models*. Daniel B. Warnell School of Forest Resources. University of Georgia. Athens.
- ELENA ROSSELLÓ, R. & SÁNCHEZ PALOMARES, O.; 1991. Los pinares españoles de *Pinus nigra* Arn.: síntesis ecológica. *Monografías INIA* 81: 1-110.
- GÓMEZ LORANCA, J.A.; 1996. *Pinus nigra* Arn. en el Sistema Ibérico: Tablas de crecimiento y producción. *Monografía INIA* 93: 1-106.
- KHATTREE, R. & NAIK, D.N.; 1995. *Applied multivariate statistics with SAS software*. SAS Insitute Inc. Cary. NC.
- OLIVER, C.H. & LARSON, B.; 1996. *Forest stand dynamics*. John Wiley & Sons. New York.
- PITA CARPENTER, P. A.; 1965. Clasificación provisional de las calidades de estación en las masas de pino laricio y pino carrasco de la Península Ibérica. *Anales del IFIE* 10: 35-59. Madrid.
- ZEIDE, B.; 1993. Analysis of Growth Equations. *For. Sci.* 39: 594.