

Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don

M. F. Álvarez Taboada¹, M. Barrio Anta², J. Gorgoso Varela²
y J. G. Álvarez González^{2*}

¹ Departamento de Ingeniería Minera. Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria. Universidad de León. Avda. Astorga, s/n. 24400 Ponferrada. España

² Departamento de Enxeñaría Agroforestal. Escola Politécnica Superior de Lugo. Universidade de Santiago de Compostela. Campus Universitario, s/n. 27002 Lugo. España

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia que tiene la competencia sobre el crecimiento en sección de árboles individuales de *Pinus radiata*. Para ello se han medido 30 parcelas distribuidas por distintos puntos de la provincia de Lugo, analizando la competencia ejercida sobre 90 pies representativos de los estratos dominante, intermedio y dominado, por los árboles que les rodean y que han sido elegidos según diferentes criterios de selección. Se han analizado 14 índices de competencia distintos: nueve de ellos dependen de la distancia entre pies y otros cinco son independientes de este valor. Estos índices se han combinado con nueve métodos diferentes de selección de árboles competidores y se han comparado mediante el ajuste de dos modelos de crecimiento en sección normal, uno potencial y otro exponencial.

Palabras clave: *Pinus radiata*, índices de competencia, crecimiento en sección.

Abstract

Influence of the competition on the section growth in *Pinus radiata* D. Don

The objective of this work is to analyse the influence that competition has on the section growth of single trees of *Pinus radiata*. Thirty plots distributed along the Lugo Province were measured. The influence of the competition was studied on 3 trees per plot, which represent the dominant, intermediate and dominated tree layers. The competitor trees were selected by different selection criteria. Fourteen different competition indexes were studied: nine of them depend on the distance among trees and the other five do not depend on it. These indexes have been matched with nine different selection methods of competitor trees and all of them have been compared using the approach of two growth models in normal section, one potential and the other one exponential.

Key words: *Pinus radiata*, competition indexes, section growth.

Introducción

El crecimiento de los árboles es resultado de dos factores opuestos (Zeide, 1993): por una parte está la tendencia intrínseca hacia un crecimiento ilimitado, que depende del potencial biótico del individuo, de su actividad fotosintética, de la absorción de nutrientes, de los procesos anabólicos y catabólicos, etc.; y en el lado opuesto se encuentran las restricciones al crecimiento, impuestas por el entorno en el que se desenvuelve dicho individuo (competencia con otros individuos, limi-

tación de los recursos, procesos respiratorios y estrés) y por la propia condición de ser vivo (mecanismos de autorregulación del crecimiento y envejecimiento).

Aunque los factores que regulan el crecimiento son complejos y aún poco conocidos, es aceptado universalmente que uno de los que más influye sobre el mismo es la interacción espacial con otros árboles cercanos. El término que se suele emplear para definir dicha interacción espacial es el de competencia, sin embargo la interacción no es únicamente un proceso antagónico, como parece indicar el término competencia, sino que también provoca situaciones que favorecen a todos los pies afectados, como la protección o adaptación mutua al medio (Trepl, 1994).

* Autor para la correspondencia: algonjg@lugo.usc.es
Recibido: 04-12-01; Aceptado: 08-10-02.

Según Ford y Sorrensen (1992) esta relación entre crecimiento y competencia se puede sintetizar en cinco axiomas básicos:

— Las plantas modifican su entorno al crecer, reduciendo los recursos disponibles para otras plantas con las que compiten.

— El principal mecanismo de competición es la interacción espacial.

— Como consecuencia de la disminución de los recursos, las plantas ven reducido su crecimiento y el efecto final de la competencia es la muerte.

— Las plantas se adaptan a los cambios de su entorno, responden a la competencia y modifican la naturaleza de la competición.

— En los procesos de competición hay diferencias entre especies.

La cuantificación del efecto de la competencia en el crecimiento en sección es uno de los requisitos primordiales para la construcción de un modelo de árbol individual (Gadow y Hui, 1999; Schröder, 2000), y el objetivo de este trabajo es obtener una combinación de un índice de competencia y un método de elección de árboles competidores que no requieran excesivas mediciones en campo y sean sencillos de utilizar para integrarlos dentro de un modelo de árbol individual para *Pinus radiata* en Galicia.

Material y métodos

Datos empleados

Los datos empleados en este trabajo provienen de 30 parcelas no permanentes instaladas en masas regulares de *Pinus radiata* distribuidas por toda la provincia de Lugo tratando de cubrir las diferentes calidades de estación y densidades presentes, abarcando un rango de edades comprendidas entre 13 y 32 años, e imponiendo la condición de que en todas ellas se haya alcanzado el estado de monte bravo, reflejado por la tangencia de copas y que marca el inicio de la competencia intraespecífica. Además, se estableció como requisito imprescindible que durante los últimos cinco años (período de crecimiento analizado) las masas no hayan sido aclaradas ni podadas para garantizar que no hayan variado las condiciones de competencia en dicho período.

En cada rodal seleccionado se instaló una parcela circular de 10 m de radio en la que se seleccionaron tres pies, designados como «árboles control», sobre cuyo

crecimiento en sección se analizará la influencia de la competencia, y que representan los estratos dominante, intermedio y dominado. Como árbol representativo del estrato dominante se seleccionó aquel pie cuyo diámetro se correspondiese con el percentil del 95% de la distribución diamétrica de la parcela, en el caso del estrato intermedio se escogió el árbol correspondiente al percentil del 50%, y por último, el estrato dominado se representó por el árbol correspondiente al percentil del 5%. En estos pies se midió el diámetro normal en cruz con forcípula de precisión milimétrica; la altura total y la altura de copa, entendida como la altura desde la primera rama viva hasta el ápice, con hipsómetro de apreciación hasta 0,25 m; el diámetro de copa en cruz con cinta métrica y aproximación al centímetro; el espesor de corteza normal con calibrador de corteza de precisión milimétrica y el crecimiento radial sin corteza de los cinco últimos años con barrena Pressler y medición con regla de apreciación milimétrica.

A continuación se determinaron, por diferentes metodologías, los árboles que compiten directamente con los pies representativos de cada uno de los tres estratos. En estos árboles, designados como «árboles competidores», se ha medido la distancia horizontal al «árbol control» con cinta métrica y apreciación hasta el centímetro; el rumbo de la recta que une ambos árboles empleando brújula; el diámetro normal en cruz con forcípula de precisión milimétrica; la altura total y la altura de copa con hipsómetro de apreciación hasta 0,25 metros; el diámetro de copa, con dos mediciones en cruz, empleando cinta métrica con una apreciación de un centímetro y el crecimiento radial sin corteza de los cinco últimos años con barrena Pressler y medición con regla de apreciación milimétrica.

Además, en cada parcela se determinaron otras variables de masa como la edad, altura media y dominante, densidad, área basimétrica, espaciado relativo e índice de sitio; éste último calculado con la ecuación de Sánchez (2001). En la Tabla 1 se muestran los valores medios, mínimo, máximo y desviación típica de las principales variables de masa de las parcelas instaladas.

Índices de competencia analizados

El concepto de la competencia ha sido estudiado por un gran número de autores desde hace más de medio siglo y para distintas especies (Clark y Evans, 1954; Arney, 1973; Alemdag, 1978; Lorimer, 1983; Tomé y Bur-

Tabla 1. Valores medio, mínimo, máximo y desviación típica de las principales variables de masa de las parcelas analizadas

Variable	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Edad (años)	22,166	4,639	13,000	32,000
Altura dominante (m)	22,320	3,421	16,750	27,700
Índice de sitio (m a los 20 años)	21,153	2,456	16,870	25,970
Densidad (pies/ha)	1156,033	641,006	338,000	3660,000
Área basimétrica (m ² /ha)	11,993	2,136	7,504	15,329
Espaciamiento relativo (m)	0,143	0,024	0,092	0,199
Diámetro medio (cm)	22,266	4,761	12,202	30,487

khart, 1989; Rennols y Smith, 1993; Biging y Dobbertin, 1995, etc.) y se ha cuantificado mediante los llamados «índices de competencia», que tratan de asignar un valor a la influencia que sobre el espacio vital de un árbol de referencia ejercen los pies que le rodean.

Según Munro (1974) los índices de competencia se clasifican en dos categorías: índices independientes de la distancia entre pies e índices dependientes de dicha distancia.

Los índices independientes de la distancia no tienen en cuenta la distribución espacial de los árboles y evalúan la competencia con variables de masa, por lo que se asume que todos los pies compiten entre sí. Los índices de este tipo empleados en este trabajo son: el ín-

dice de Reineke, la fracción de cabida cubierta (FCC), el factor de competencia de copas (CCF), el índice del área basal de los pies con diámetro normal superior al del pie competido (BAL) y una modificación de este último (BALMOD), propuesta por Schröder y Gadow (1999), que tiene en cuenta la selvicultura realizada con la masa al incluir el valor del índice de Hart-Becking. En la Tabla 2 se muestran las expresiones matemáticas que permiten el cálculo de estos índices.

Los índices dependientes de la distancia tienen en cuenta la distribución espacial de los árboles. Se basan en considerar que las variables de masa no son suficientes para explicar la competencia ejercida por los árboles vecinos, y su empleo requiere la definición de

Tabla 2. Expresión matemática de los índices de competencia independientes de la distancia

Nombre del índice	Expresión
Índice de Reineke	$10^{(\log N + 1,605 \cdot \log \bar{d} - 1,605)}$
Fracción de cabida cubierta (FCC)	$\frac{\sum_{i=1}^n \pi \cdot D_{copa\ i}^2}{4 S_{parcela}}$
Factor de competencia de copas (CCF)	$\frac{\sum_{i=1}^N \pi \cdot D_{c\ max\ i}^2}{4 S_{parcela}}$
Basal area in larges trees (BAL)	$\sum_{i=1}^t \frac{\pi \cdot d_{mayor\ i}^2}{4}$
BAL modificado (BALMOD)	$\frac{1 - \left[1 - \left(\frac{BAL_i}{G} \right) \right]}{I. Hart}$

N: número de pies/ha en la parcela. \bar{d} : diámetro medio de la parcela (cm). $d_{mayor\ i}$: diámetro normal de los árboles mayores que el árbol control (cm). $D_{copa\ i}$: diámetro de copa del árbol i. $D_{c\ max\ i}$: diámetro de copa máximo del árbol i calculado según la ecuación propuesta por Leech (1984). BAL_i : valor del BAL para el árbol i. G: área basimétrica de la parcela (m²/ha). I. Hart: índice de Hart-Becking de la parcela.

un criterio que establezca qué árboles compiten realmente con el pie analizado y en qué grado lo hacen. En la Tabla 3 se presentan los índices dependientes de la distancia empleados en este estudio.

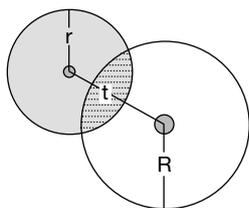
Métodos de selección de competidores

Se han propuesto numerosos criterios para seleccionar los árboles que compiten directamente con el

Tabla 3. Expresión matemática de los índices de competencia dependientes de la distancia empleados

Nombre del índice	Expresión
Staebler (1951)	$\sum_{i \neq j} L_{ij}$
Gerrard (1969)	$\sum_{i \neq j} \frac{O_{ij}}{Z_i}$
Bella (1971)	$\sum_{i \neq j} \frac{O_{ij} \cdot d_j}{Z_i \cdot d_i}$
Hegyí (1974)	$\sum_{i \neq j} \frac{d_j}{d_i \cdot Dist_{ij}}$
Alemdag (1978)	$\sum_{i \neq j} \left\{ \pi \cdot \left[\frac{Dist_{ij} \cdot d_i}{d_i + d_j} \right]^2 \cdot \frac{d_j}{Dist_{ij}} \right\}$
Martin-Ek (1984)	$\sum_{i \neq j} \frac{d_j}{d_i} \cdot \exp \left(\frac{16 \cdot Dist_{ij}}{d_i + d_j} \right)$
Daniels <i>et al.</i> (1986)	$\frac{d_i^2 \cdot n}{\sum_{i \neq j} d_j^2}$
Pukkala y Kolström (1987)	$\sum_{i \neq j} \frac{h_i}{h_j \cdot Dist_{ij}}$
Crown cross-sectional area (CCS)	$\sum_{i \neq j} \frac{CC_j}{CC_i \cdot Dist_{ij}}$

L_{ij} : longitud de la línea que une los centros del árbol control y del competidor que está incluida en el área donde se superponen sus zonas de influencia (m). Z_i : área de la zona de influencia del árbol control (m^2). d_i : diámetro normal del árbol control (cm). d_j : diámetro normal del árbol competidor (cm). $Dist_{ij}$: distancia en proyección horizontal entre el árbol control y el competidor (m). CC_i : superficie de copa del árbol control (m^2). CC_j : superficie de copa del árbol competidor (m^2). n : número de árboles competidores. h_i : altura total del árbol control (m). h_j : altura total del árbol competidor (m). O_{ij} : área de solapamiento entre las zonas de influencia del árbol control y el árbol competidor (m^2), que se ha calculado según la siguiente ecuación (Lee y Gadaw, 1997), que es válida cuando $r - R < t < r + R$:



$$O_{ij} = r^2 \cdot \left\{ \arccos \left(\frac{t^2 + r^2 - R^2}{2tR} \right) - \frac{t^2 + r^2 - R^2}{4t^2 R^2} \left[4t^2 r^2 - (t^2 + r^2 - R^2) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} +$$

$$R^2 \cdot \left\{ \arccos \left(\frac{t^2 - r^2 - R^2}{2tR} \right) - \frac{t^2 - r^2 + R^2}{2tR} \left[4t^2 R^2 - (t^2 - r^2 + R^2) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

«árbol control». Unos se basan en considerar competidores todos los pies incluidos dentro de un círculo de radio fijo alrededor del árbol control (Hegyí, 1974), otros en utilizar radios variables ponderados por las dimensiones de los árboles, ya sea diámetro o altura (Daniels, 1976; Ford y Diggle, 1981) y otros en la combinación de varios de estos criterios (Biging y Dobbertin, 1992). En este trabajo se han probado nueve criterios de selección de competidores denominados con los códigos C1 a C9 y que ya han sido ampliamente utilizados en trabajos de similares características (Martínez Millán y Madrigal, 1982; Pukkala y Kolström, 1987; Holmes y Reed, 1991; Biging y Dobbertin, 1992; Mäkinen, 1997 y Schröder y Gadow, 1999).

El criterio C₁ se basa en seleccionar como «árboles competidores» todos aquellos incluidos en una parcela móvil de Bitterlich con centro en el «árbol control» y con un factor de área basal (BAF) igual a 4.

El criterio C₂ es similar al anterior pero considera también como «árboles competidores» los pies más cercanos al «árbol control» en cualquier dirección, aunque no estén incluidos en la parcela móvil de Bitterlich.

El criterio C₃, propuesto por Biging y Dobbertin (1992), se basa en considerar competidores activos aquellos árboles cuya altura total supera una línea imaginaria trazada desde la base del árbol control con una inclinación de 60° con respecto a la horizontal (Fig. 1).

De la figura anterior se deduce que la relación entre distancia y altura que determina si un árbol se selecciona como competidor activo es la siguiente:

$$\operatorname{tg}60^\circ = \frac{HT_j}{Dist_{ij}} = 1,73 \quad \Rightarrow \quad Dist_{ij} \leq \frac{HT_j}{1,73}$$

El cuarto criterio (C4) es similar al anterior pero en este caso la recta inclinada tiene su origen en la base de la copa del árbol control (Fig. 2).

La relación entre la distancia y las alturas que determina si un árbol se selecciona como competidor activo se deduce de la figura anterior:

$$\operatorname{tg}60^\circ = \frac{HT_j - HRV_i}{Dist_{ij}} = 1,73 \quad \Rightarrow \quad Dist_{ij} \leq \frac{HT_j - HRV_i}{1,73}$$

El quinto criterio (C₅) se basa en el concepto de *zona de influencia* que fue inicialmente propuesto por Staebler (1951). La zona de influencia de un árbol es un círculo cuyo centro está en la base de dicho árbol y cuyo radio varía dependiendo de los autores. Se consideran competidores activos todos aquellos pies cuya zona de influencia se solapa con la zona de in-

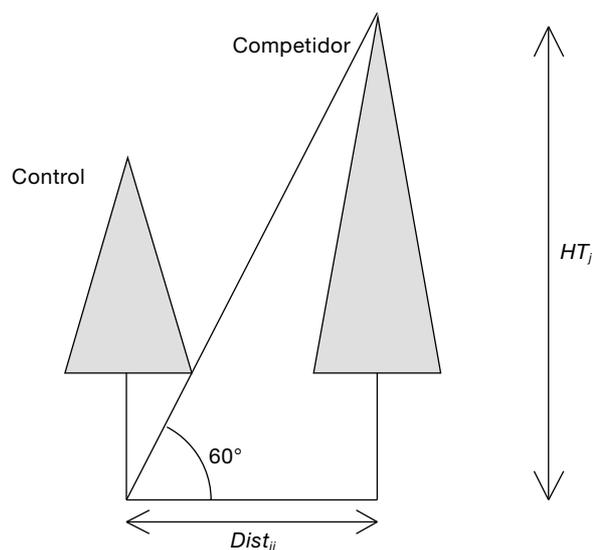


Figura 1. Esquema del empleo del criterio de selección de competidores C3.

fluencia del árbol control, es decir, cuando se cumpla la siguiente condición:

$$Dist_{ij} \leq R_{Zl_i} + R_{Zl_j}$$

Donde R_{Zl_i} y R_{Zl_j} son el radio de la zona de influencia del árbol control y del posible competidor, respectivamente y $Dist_{ij}$ es la distancia entre el árbol control y el posible competidor.

En este trabajo se ha considerado como radio de la zona de influencia al valor máximo que podría alcanzar el radio de la copa del árbol si estuviese creciendo

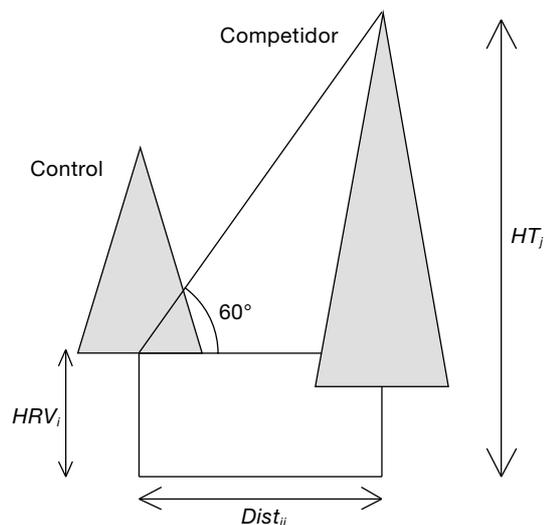


Figura 2. Esquema del empleo del criterio de selección de competidores C4.

sin competencia. Dicho valor se ha determinado mediante el empleo de la ecuación ajustada por Leech (1984) para *Pinus radiata* en Australia y que relaciona el diámetro máximo de copa de un árbol (D_{CMAX}) con su diámetro normal (d):

$$D_{CMAX} = 0,7544 + 0,2073 \cdot d$$

Los criterios C_6 a C_9 se basan en el concepto de *ángulo de eliminación de competencia* (Lee y Gadow, 1997), según el cual se selecciona como primer competidor activo al pie más cercano al árbol control. A continuación se delimita un sector circular con un ángulo determinado y cuya bisectriz es la línea que une el árbol control y el seleccionado. Todos los árboles incluidos en dicho sector circular son descartados como posibles competidores activos. El proceso continúa con la selección del pie más cercano al árbol control y situado fuera del primer sector circular, repitiendo el proceso hasta identificar todos los competidores *activos* (Fig. 3).

Los ángulos de eliminación de competencia utilizados han sido 90, 60, 45 y 30 grados, para los criterios C_6 a C_9 , respectivamente.

No todos los índices de competencia están diseñados para emplear cualquier criterio de selección de competidores. Los índices de Staebler (1951), Gerrard (1969) y Bella (1971) sólo pueden aplicarse cuando se combinan con el criterio de selección C_5 , puesto que están basados en el concepto de *zona de influencia*. El resto de los índices utilizados en este estudio son compatibles con todos los criterios descritos anteriormente.

Modelos de crecimiento en sección normal

El crecimiento en sección de un árbol depende, fundamentalmente, de la sección normal al inicio del pe-

ríodo analizado, de la edad del árbol, de la calidad de estación y de la competencia que sobre la luz, el agua, los nutrientes y el espacio físico ejercen los pies que le rodean. Por tanto, un modelo de crecimiento en sección de árbol individual debe tener en cuenta todos estos factores.

Dado que el objetivo de este trabajo es determinar la combinación óptima de índice de competencia y criterio de selección de competidores que explique una parte importante de la variabilidad del incremento en sección normal de los pies de pino radiata, es necesario distinguir que parte de dicha variabilidad es debida a la competencia y que parte es debida a otros factores como la edad, el diámetro de partida, la densidad o la calidad de estación (Pukkala y Kolström, 1987; Schröder y Gadow, 1999; Schröder, 2000). Para ello, inicialmente se ha ajustado un modelo lineal básico que relaciona el crecimiento en sección normal con todos los factores citados, a excepción del índice de competencia (ecuación [1]), y posteriormente se ha completado el modelo incluyendo el índice de competencia, bien como un término potencial (ecuación [2]) o bien como un término exponencial (ecuación [3]):

$$Ln(\Delta g) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot Ln(t) + \alpha_3 \cdot Ln(d) + \alpha_4 \cdot Ln(IS) + \alpha_5 \cdot Ln(N) \tag{1}$$

$$Ln(\Delta g) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot Ln(t) + \alpha_3 \cdot Ln(d) + \alpha_4 \cdot Ln(IS) + \alpha_5 \cdot Ln(N) + \alpha_6 \cdot Ln(IC) \tag{2}$$

$$Ln(\Delta g) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot Ln(t) + \alpha_3 \cdot Ln(d) + \alpha_4 \cdot Ln(IS) + \alpha_5 \cdot Ln(N) + \alpha_6 \cdot IC \tag{3}$$

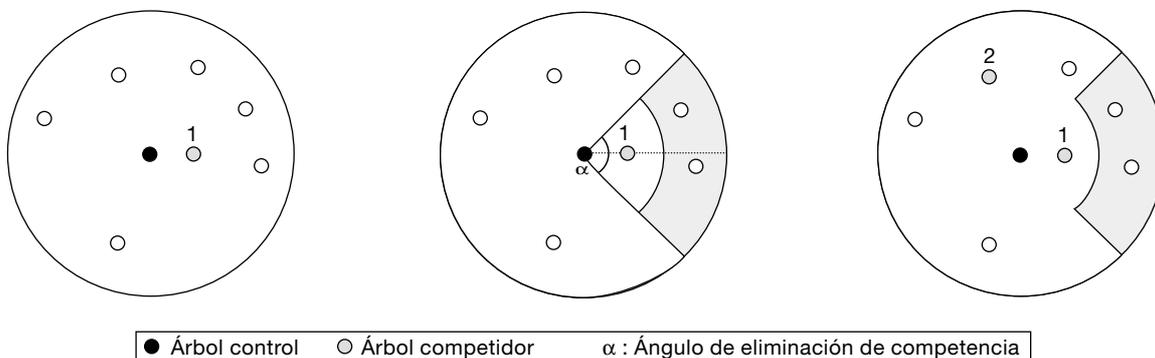


Figura 3. Esquema del proceso de selección de los competidores activos según el concepto de ángulo de eliminación de competencia (Lee y Gadow, 1997).

Donde \ln es logaritmo neperiano, Δg es el crecimiento en sección normal durante los últimos cinco años expresado en cm^2 ; t es la edad en años, d es el diámetro normal inicial en cm, IS el índice de sitio en metros, N es el número de pies por hectárea, IC es el índice de competencia empleado y α_i son los parámetros a estimar en el ajuste.

Las tres ecuaciones se han ajustado por mínimos cuadrados ordinarios con el procedimiento REG del programa estadístico SAS/STAT™ (Sas Institute, 1999). Para analizar la posible existencia de colinealidad se han calculado los valores del factor de inflación de varianza (VIF), desestimándola en caso de que sean inferiores a 10 (Ryan, 1997).

También se ha calculado el coeficiente de correlación lineal entre el logaritmo del crecimiento en sección del árbol y el valor del índice de competencia (modelo exponencial) o el valor del logaritmo del índice de competencia (modelo potencial).

La elección de la mejor combinación de índice de competencia y método de selección de competidores se ha basado en el análisis gráfico de los residuos, en los valores del error medio cuadrático (EMC) y en el porcentaje de reducción del error medio cuadrático (REMC) de los modelos completos [2] y [3] con respecto al modelo básico [1] (Biging y Dobbertin, 1992 y Schröder y Gadow, 1999):

$$\text{Error medio cuadrático: EMC} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - p}$$

Porcentaje de reducción en el error medio cuadrático:

$$\text{REMC} = \left(1 - \frac{\text{EMC}_2}{\text{EMC}_1} \right)$$

Donde N es el número total de datos usados en el ajuste; p es el número de parámetros del modelo e y_i , e \hat{y}_i son el valor observado y el valor predicho del creci-

miento en sección, respectivamente. EMC_1 es el error medio cuadrático del modelo básico sin incluir ningún índice de competencia y EMC_2 el error medio cuadrático del modelo completo (ecuación [2] o ecuación [3]).

Resultados y Discusión

En la Tabla 4 se presentan los resultados del ajuste del modelo básico (ecuación [1]). El análisis gráfico de los residuos no indicó ningún tipo de incumplimiento de las hipótesis de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de errores.

La Tabla 5 muestra los valores del coeficiente de correlación y de los estadísticos de comparación obtenidos en el ajuste de los modelos potencial y exponencial (ecuaciones [2] y [3] respectivamente) cuando se emplean los índices de competencia independientes de la distancia. En ningún caso el análisis gráfico de los residuos sugirió un incumplimiento de las hipótesis de partida del ajuste.

Los resultados muestran que los índices de competencia que tienen un valor constante para todos los pies (índice de Reineke, fracción de cabida cubierta y factor de competencia de copas) presentan, como era de esperar, un porcentaje muy bajo de reducción del error medio cuadrático (REMC) e incluso valores negativos como en el caso del índice de Reineke, debido a que la disminución del valor de la suma de cuadrados del error no compensa la reducción del número de grados de libertad al incluir un nuevo parámetro en el modelo. Estos resultados son similares a los obtenidos por Biging y Dobbertin (1995) para masas mixtas de coníferas en California.

El empleo de índices independientes de la distancia cuyo valor no es constante para todos los árboles de la masa, como el BAL, y su modificación (BALMOD), supone una reducción importante del error medio cua-

Tabla 4. Resultados del ajuste del modelo básico de crecimiento en sección (ecuación [1])

Variable	Parámetro	Estimación	Error estándar	t	VIF	R ²	EMC
T. indep.	α_1	-1,5995	0,5453	-2,933		0,7517	0,1574
Ln(t)	α_2	-0,1556	0,0364	-4,275	2,5263		
Ln(d)	α_3	1,0533	0,0698	15,080	1,3850		
Ln(IS)	α_4	0,6352	0,1671	3,801	1,3685		
Ln(N)	α_5	0,3147	0,1496	2,103	2,3864		

VIF es el factor de inflación de varianza del parámetro, R² es el coeficiente de determinación del modelo y EMC es el error medio cuadrático del modelo.

Tabla 5. Resultados del ajuste de los modelos potencial (ecuación [2]) y exponencial (ecuación [3]) de crecimiento en sección, empleando los índices de competencia independientes de la distancia

Índice	Modelo	Estadísticos de comparación		
		Coef. correlación	EMC	REMC (%)
Reineke	EXP.	-0,0280	0,1593	-1,2071
	POT.	-0,0262	0,1593	-1,2071
F.C.C.	EXP.	0,2000	0,1563	0,6988
	POT.	0,1974	0,1557	1,0801
C.C.F.	EXP.	0,0172	0,1555	1,2071
	POT.	0,0154	0,1546	1,7789
BAL	EXP.	-0,3215*	0,1271	19,2503
	POT.	-0,3225*	0,1256	20,2033
BAL MOD	EXP.	-0,7243**	0,1196	24,0152
	POT.	-0,7184**	0,1192	24,2694

** Significativo al 99%. * Significativo al 95%.

drástico del modelo básico, tanto para el término exponencial (19 a 24% respectivamente) como para el potencial (20 a 24% respectivamente). Estos valores son muy superiores a los obtenidos por Schröder y Gadow (1999) para *Pinus pinaster* en Galicia empleando un modelo exponencial, con porcentajes de mejora de un 3,24% y un 5,13% para el índice BAL y el índice BALMOD respectivamente, y también a los obtenidos por Biging y Dobbertin (1995) para masas mixtas de coníferas, que variaban entre un 0% y un 10% de mejora al incluir en el modelo el índice BAL.

Los coeficientes de correlación del índice BALMOD con el logaritmo del crecimiento en sección son muy superiores a los obtenidos con el índice BAL (-0,7 frente a -0,3), lo que indica que la inclusión del área basimétrica y del índice de Hart-Becking de la masa mejora la

capacidad predictiva del índice. Sin embargo, dicha mejora no se ve reflejada en la reducción en el valor del error medio cuadrático del modelo básico, que en el caso del BALMOD es sólo ligeramente superior (entre un 5% y un 6%) al modelo que incluye el índice BAL, debido a que en el modelo básico ya se tiene en cuenta la densidad de la masa (N) y su calidad de estación (IS).

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en el ajuste de los modelos de crecimiento al emplear los índices de competencia dependientes de la distancia entre pies que están basados en el concepto de zona de influencia, es decir, aquellos que únicamente admiten el criterio C₃ como método de selección de árboles competidores. El análisis gráfico de los residuos no indicó incumplimientos de las hipótesis de partida del ajuste por mínimos cuadrados para ninguno de los índices analizados.

Tabla 6. Resultados del ajuste de los modelos potencial (ecuación [2]) y exponencial (ecuación [3]) de crecimiento en sección, empleando los índices de competencia dependientes de la distancia basados en el concepto de zona de influencia, criterio de selección de competidores C5

Índice	Modelo	Estadísticos de comparación		
		Coef. correlación	EMC	REMC (%)
Staebler (1951)	EXP.	0,7947**	0,1165	25,9847
	POT.	0,8401**	0,1057	32,8462
Gerrard (1969)	EXP.	-0,1269	0,1540	2,1601
	POT.	-0,1014	0,1541	2,0965
Bella (1971)	EXP.	-0,7340**	0,1553	1,3342
	POT.	-0,7195**	0,1542	2,0030

** Significativo al 99%. * Significativo al 95%.

Los mejores resultados corresponden al índice de Staebler (1951) con una reducción del error medio cuadrático que oscila entre un 26% y un 33% para el modelo exponencial y potencial respectivamente. Los índices de Gerrard y Bella no aportan una mejora sustancial al modelo básico. Estos resultados son inferiores a los obteni-

dos por Biging y Dobertin (1992), que observaron que el efecto de la inclusión del índice de Bella en el modelo básico variaba en función de la tolerancia a la sombra de la especie analizada. La reducción del error medio cuadrático era importante en las especies tolerantes (25%) y mucho menor en las especies intolerantes (10%).

Tabla 7. Resultados del ajuste de los modelos potencial (ecuación [2]) y exponencial (ecuación [3]) de crecimiento en sección, empleando los índices de competencia dependientes de la distancia, combinados con todos los criterios de selección de competidores

Índice	Modelo		Criterio de selección de competidores								
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Hegyí (1974)	EXP.	Coef. correlación	-0,7672**	-0,7913**	-0,7906**	-0,7315**	-0,6759**	-0,8081**	-0,8215**	-0,8274**	-0,8344**
		EMC	0,1432	0,1362	0,1364	0,1470	0,1534	0,1441	0,1371	0,1394	0,1349
		REMC (%)	9,0216	13,4689	13,3418	6,6074	2,5413	8,4498	12,8971	11,4358	14,2948
	POT.	Coef. correlación	-0,7969**	-0,8674**	-0,8667**	-0,7751**	-0,6858**	-0,8480**	-0,8665**	-0,8685**	-0,8821**
		EMC	0,1482	0,1206	0,1211	0,1419	0,1572	0,1392	0,1290	0,1282	0,1214
		REMC (%)	5,8450	23,3799	23,0623	9,8475	0,1271	11,5629	18,0432	18,5515	22,8717
Alemdag (1978)	EXP.	Coef. correlación	0,6735**	0,6918**	0,7101**	0,3671**	0,7643**	0,6633**	0,6231**	0,6609**	0,6438**
		EMC	0,1518	0,1566	0,1550	0,1582	0,1452	0,1558	0,1590	0,1564	0,1568
		REMC (%)	3,5578	0,5083	1,5248	-0,5083	7,7510	1,0165	-1,0165	0,6353	0,3812
	POT.	Coef. correlación	0,7649**	0,7829**	0,7987**	0,4016**	0,9118**	0,7563**	0,7362**	0,7830**	0,7581**
		EMC	0,1499	0,1558	0,1533	0,1592	0,1034	0,1532	0,1592	0,1509	0,1526
		REMC (%)	4,7649	1,0165	2,6048	-1,1690	34,3075	2,6684	-1,1436	4,1296	3,0496
Martín-Ek (1984)	EXP.	Coef. correlación	-0,7879**	-0,7896**	-0,8035**	-0,7085**	-0,6052**	-0,8317**	-0,8977**	-0,8885**	-0,8609**
		EMC	0,1357	0,1309	0,1289	0,1480	0,1541	0,1314	0,0966	0,1110	0,1200
		REMC (%)	13,7865	16,8361	18,1067	5,9720	2,0966	16,5184	38,6277	29,4790	23,7611
	POT.	Coef. correlación	-0,7500**	-0,8449**	-0,8542**	-0,6956**	-0,5472**	-0,8499**	-0,8957**	-0,8961**	-0,8758**
		EMC	0,1412	0,1162	0,1156	0,1426	0,1557	0,1190	0,0894	0,1002	0,1074
		REMC (%)	10,2922	26,1753	26,5565	9,4028	1,0801	24,3964	43,2020	36,3405	31,7662
Daniels <i>et al.</i> (1986)	EXP.	Coef. correlación	0,8010**	0,8028**	0,8058**	0,7933**	0,8097**	0,6241**	0,7385**	0,7992**	0,7863**
		EMC	0,1198	0,1214	0,1190	0,1285	0,1163	0,1446	0,1289	0,1224	0,1261
		REMC (%)	23,8882	22,8717	24,3964	18,3609	26,1118	8,1321	18,1067	22,2363	19,8856
	POT.	Coef. correlación	0,9054**	0,8983**	0,8993**	0,8828**	0,8975**	0,8759**	0,8904**	0,8950**	0,8896**
		EMC	0,0851	0,0868	0,0850	0,1048	0,0884	0,1059	0,0944	0,0886	0,0929
		REMC (%)	45,9339	44,8539	45,9975	33,4180	43,8374	32,7192	40,0254	43,7103	40,9784
Pukkala-Kolström (1987)	EXP.	Coef. correlación	-0,6013**	-0,6377**	-0,6383**	-0,6223**	-0,2546*	-0,6494**	-0,6530**	-0,6321**	-0,6639**
		EMC	0,1584	0,1545	0,1546	0,1551	0,1557	0,1591	0,1574	0,1593	0,1585
		REMC (%)	-0,6353	1,8424	1,7789	1,4612	1,0801	-1,0801	0,0000	-1,2071	-0,6989
	POT.	Coef. correlación	-0,5738**	-0,6370**	-0,6398**	-0,5587**	-0,1889	-0,6413**	-0,6403**	-0,6256**	-0,6680**
		EMC	0,1593	0,1562	0,1565	0,1547	0,1521	0,1592	0,1582	0,1593	0,1585
		REMC (%)	-1,2071	0,7624	0,5718	1,7154	3,3672	-1,1436	-0,5083	-1,1881	-0,6989
CCS	EXP.	Coef. correlación	-0,5542**	-0,5445**	-0,5444**	-0,5037**	-0,5367**	-0,5376**	-0,5466**	-0,5534**	-0,5479**
		EMC	0,1580	0,1573	0,1573	0,1593	0,1591	0,1592	0,1591	0,1585	0,1584
		REMC (%)	-0,3812	0,0635	0,0635	-1,2071	-1,0801	-1,1436	-1,0801	-0,6989	-0,6353
	POT.	Coef. correlación	-0,8000**	-0,8191**	-0,8195**	-0,8182**	-0,7786**	-0,8027**	-0,8131**	-0,8109**	-0,8207**
		EMC	0,1424	0,1369	0,1370	0,1352	0,1459	0,1413	0,1382	0,1403	0,1376
		REMC (%)	9,5299	13,0241	12,9606	14,1042	7,3062	10,2287	12,1982	10,8640	12,5794

** Significativo al 99%. * Significativo al 95%.

Cabe destacar que los elevados coeficientes de correlación observados entre el índice de Bella y el logaritmo del crecimiento en sección (cercaos a $-0,7$) no se traducen en una mejora sustancial del error medio cuadrático del modelo básico, debido a que una parte importante de la variabilidad del crecimiento se explica por las variables que definen la situación inicial del árbol (edad y diámetro inicial), y la densidad y calidad de estación de la masa.

En la Tabla 7 se incluyen los valores de los coeficientes de correlación y de los estadísticos de comparación obtenidos en el ajuste de los modelos potencial y exponencial cuando se emplean los restantes índices de competencia dependientes de la distancia. Al igual que en los casos anteriores, el análisis gráfico de los residuos no indicó incumplimientos de las hipótesis de partida del ajuste.

Los mejores resultados para el conjunto de todos los criterios de selección de competidores se obtienen con el índice de Daniels *et al.* (1986), con porcentajes de reducción medio del error medio cuadrático del modelo básico de un 41,3% para el modelo potencial y de un 20,44% para el modelo exponencial. Los coeficientes de correlación entre el valor de este índice y el logaritmo del crecimiento en sección son también muy elevados (de 0,6 a 0,9) y superiores a los obtenidos por Holmes y Reed (1991) para dos especies de arce, aunque las metodologías utilizadas no son directamente comparables.

Otro índice que presenta excelentes resultados es el de Martín-Ek (1984), especialmente cuando se ajusta según un modelo potencial y se emplean los criterios de selección de competidores basados en el concepto de ángulo de eliminación de competencia con valores de 60, 45 y 30 grados (C_7 , C_8 y C_9 , respectivamente). Para el resto de los criterios no supera, en general, los valores de reducción del error medio cuadrático mostrados por el índice BAL o su modificación. Los resultados de este índice son muy superiores a los obtenidos por Biging y Dobbertin (1992 y 1995) para especies de temperamento similar a *Pinus radiata*.

Los valores de reducción del error medio cuadrático obtenidos con el índice de Hegyi (1974) varían mucho según el criterio de selección de competidores empleado, aunque en todo caso son inferiores a los obtenidos con dos índices independientes de la distancia como son el BAL y BALMOD.

En general, el empleo de los restantes índices aporta poca nueva información al modelo básico, sea cual sea el criterio de elección de competidores utilizado.

En la mayoría de los casos se observa que el modelo de crecimiento potencial reduce el error medio cuadrático en mayor medida que el exponencial, especialmente en aquellos índices que han mostrado mejores resultados en los ajustes, obteniéndose en el caso del índice de Daniels *et al.* (1986) una reducción media del error medio cuadrático del 21,5% con respecto al modelo exponencial.

En cuanto a los criterios de selección de competidores son los basados en ángulos de eliminación de competencia los que resultan más adecuados al combinarlos con los índices que mejores resultados han mostrado en los ajustes (Daniels *et al.*, 1986; Martín y Ek, 1984; Hegyi, 1974), sobre todo cuando se emplean ángulos de 60, 45 y 30 grados (C_7 , C_8 y C_9). Además, estos criterios son sencillos de aplicar y limitan enormemente el número de competidores, por lo que son muy adecuados para su empleo en campo.

El criterio basado en la *zona de influencia* (C_5) muestra unos resultados muy buenos cuando se combina con el índice de Staebler (1951).

Los restantes criterios muestran, en general, unos resultados muy similares, tanto si están basados en relaciones altura del competidor-distancia (C_3 y C_4) como en la relación diámetro del competidor-distancia (C_1 y C_2), lo que hace más aconsejable el empleo de estos últimos por ser más rápida la medición de diámetros que la de alturas.

Los excelentes resultados obtenidos con el índice de Daniels *et al.* (1986) combinado con el método de selección de competidores basado en un ángulo de eliminación de competencia de 45°, unido a la sencillez de aplicación, tanto del índice como del criterio de determinación de los competidores activos, aconsejan su inclusión en un futuro modelo de crecimiento en sección normal de árbol individual de *Pinus radiata* en Galicia.

Referencias bibliográficas

- ALEMDAG P.G., 1978. Evaluation of some competition indexes for the prediction of diameter increment in planted white spruce. F. Man. Ins. Inf. Rep. Fmr-x-108, 39 pp.
- ARNEY J.D., 1973. Tables for quantifying competitive stress on individual trees. Can. For. Serv. Inf. Report BC-X-78.
- BELLA I.E., 1971. A new competition model for individual trees. For. Sci. 17, 364-372
- 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 (3), 695-720.

- BIGING G.S., DOBBERTIN M., 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. *For. Sci.* 41 (2), 360-377.
- CLARK P.J., EVANS F.C., 1954. Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology* 35, 445-453.
- DANIELS R.F., 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *For. Sci.* 22, 454-456.
- DANIELS R.F., BURKHART H.E., CLASON T.R., 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Can. J. For. Res.* 16, 1230-1237.
- FORD E.D., DIGGLE P.J., 1981. Competition for light in a plant monoculture modelled as a spatial stochastic process. *Ann Bot* 48, 481-500.
- FORD E.D., SORRENSEN K.A., 1992. Theory and models of inter-plant competition as a spatial process. En: Individual based models and approaches in ecology: Populations, communities and ecosystems. De Angelis, D.L., Gross, L.J. eds. Chapman and Hall, London.
- GADOW K.v., HUI G., 1999. Modelling Forest Development. Kluwer Academic Publishers. 213 pp.
- GERRARD D.I., 1969. Competition quotient: a new measure for the competition affecting individual forest trees. Michigan State University Agricultural Research Station, Research Bulletin 20, 1-32.
- HEGYI F., 1974. A simulation model for managing jackpine stands. Growth Models for Tree and Stand Simulation. Proc. IUFRO Meeting S4.01.04, Royal College of Forestry, Stockholm. pp. 74-90.
- HOLMES M.J., REED D.D., 1991. Competition indices for mixed species northern hardwoods. *For. Sci.* 37 (5), 1338-1349.
- LEE D.T., GADOW K.V., 1997. Iterative bestimmung der konkurrenzbaume in *Pinus densiflora* Beständen. *AFJZ* 168 (3/4), 41-44.
- LEECH J.W., 1984. Estimating crown width from diameter at breast height for open-grown radiata pine in south Australia. *Aust. For. Res.* 14, 333-337.
- LORIMER C.G., 1983. Test of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. *For. Ecol. Man.* 6, 343-360.
- MÄKINEN M., 1997. Possibilities of competition indices to describe competitive differences between Scots pine families. *Silva Fennica* 31 (1), 43-52.
- MARTIN G.L., EK A.R., 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. *For. Sci.* 30 (3), 731-743.
- MARTÍNEZ MILLÁN F.J., MADRIGAL A., 1982. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección. Comunicaciones INIA. Serie Recursos Forestales nº 13, 88 pp.
- MUNRO D.D., 1974. Forest growth models – a prognosis. Growth models for tree and stand simulation. Proc. IUFRO Meeting S4.01.04, Royal College of Forestry, Stockholm, Research Notes, N. 30, 7-21.
- PUKKALA T., KOLSTRÖM T., 1987. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fenn* 21, 55-67.
- RENNOLS K., SMITH W.R., 1993. Zone of influence models for inter tree forest competition. Stochastic Spatial Models in Forestry. Proc of a IUFRO S4.11 Conf. held in Thessaloniki, Greece. pp. 27-36.
- RYAN T.P., 1997. Modern regression methods. John Wiley & Sons. New York. 515 pp
- SÁNCHEZ F., 2001. Estudio de la calidad de estación, crecimiento, producción y selvicultura de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis doctoral. E.P.S. Lugo. Universidad de Santiago de Compostela.
- SAS INSTITUTE INC., 1999. SAS/STAT™ User's Guide, Release 8.0 Edition. Cary. N.C. USA.
- SCHRÖDER J., GADOW K.v., 1999. Testing a new competition index for maritime pine in northwestern Spain. *Can. J. For. Res.* 29, 280-283.
- SCHRÖDER J., 2000. Comparison of a spatial and non-spatial model for predicting basal area increment of individual maritime pine trees in Galicia. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen.
- STAEBLER G.R., 1951. Growth and spacing in an even-aged stand of Douglas-fir. Master's thesis, Univ. of Michigan.
- TOMÉ M., BURKHART H.E., 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *For. Sci.* 35 (3), 816-831.
- TREPL L., 1994. Competition and coexistence- on the historical background in ecology and the influence of economy and social sciences. *Ecol. Modelling* 75/76, 99-110.
- ZEIDE B., 1993. Analysis of growth equations. *For. Sci.* 39, 595-615.