

**Influencia del tamaño y la competencia sobre el crecimiento en sección de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* y su relación con la silvicultura próxima a la naturaleza**

Tíscar, P.A.<sup>1</sup>; Tíscar, M.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Capacitación y Experimentación Forestal. C/. Vadillo-Castril, s/nº. 23470 Cazorla (Jaén).  
Correo electrónico: pedroa.tiscar@juntadeandalucia.es

<sup>2</sup>Departamento de Matemáticas. IES Castillo de la Yedra. 23470 Cazorla (Jaén)

*Received: 02 November 2010*

*Accepted: 24 November 2010*

**Abstract**

*Short title: Pinus nigra growth: size and competition effects*

In this study, the influence of tree size and competition on basal area growth is analysed in a *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* population from Sierra de Cazorla (Southeast of Spain). Tree size was defined as a combination of diameter, total height and several measurements of crown dimension. All these parameters were used as independent variables in a Multiple Regression Model, with the basal area growth as response variable. The most significant independent variables were diameter and vertical crown surface, they explained 32,69% of observed growth variability. Competition was measured by means of five indices. Their ability to explain basal growth-competition relationships was explored fitting successive allometric regression models. Distance-independent indices offered better results. Diameter, vertical crown surface and distance-independent indices would be suitable variables for developing individual-tree models for the species and locality studied. Considering the results, close-to-nature silviculture can be recommended for the management of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* forests, particularly those under private ownership.

**Keywords: Individual-tree model, multiple regression, hierarchical partitioning, size dependent competition.**

**Resumen**

*Título corto: Crecimiento de Pinus nigra: efectos del tamaño y de la competencia*

En este estudio, se analiza la influencia del tamaño del árbol y de la competencia en el crecimiento en sección de una población de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* de la sierra de Cazorla (sureste de España). El tamaño se definió según el diámetro, la altura total y diferentes medidas de la dimensión de la copa. Todos estos parámetros se utilizaron como variables explicativas en un modelo de regresión múltiple, con el crecimiento en sección como variable respuesta. La competencia se cuantificó mediante cinco índices de competencia, cuya eficacia para explicar el crecimiento se comprobó ajustando alternativamente sendas regresiones alométricas. El diámetro inicial y el área ocupada por la proyección vertical de la copa explicaron juntos un 32,69% de la variabilidad observada en el crecimiento. Los índices independientes de la distancia ofrecieron mejores resultados. Estos índices, el

diámetro y el área de la copa constituirían, pues, el conjunto de variables más adecuadas para el desarrollo futuro de un modelo de crecimiento de árbol individual. En base a todo lo anterior, se recomienda una silvicultura centrada en la gestión de árboles individuales de calidad (silvicultura próxima a la naturaleza) como método de gestión de las masas de *Pinus nigra*, en particular las de propiedad particular.

**Palabras clave: Modelos de árbol individual, regresión múltiple, parición jerárquica, competencia simétrica**

## 1. Introducción

En este artículo, se analiza la influencia del tamaño y la competencia sobre el crecimiento en sección de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, y se exploran las posibilidades de los modelos de crecimiento de árbol individual (en adelante MCAI) para orientar la fase de señalamiento durante la ejecución de los tratamientos silvícolas. Se comentan también las posibilidades de la silvicultura próxima a la naturaleza como método de gestión adecuado para los montes de poca extensión y propiedad particular. Un tipo de monte muy frecuente en España.

Durante la fase de señalamiento, los silvicultores deben decidir qué árboles se cortarán en los montes gestionados para cambiar la distribución del arbolado y favorecer, así, la regeneración o el crecimiento de los árboles que quedan en pie. El trabajo consiste básicamente en avanzar por el interior del bosque, dibujando pequeñas teselas imaginarias donde se señalan o marcan los árboles que se apearán, según la densidad y estructura forestal observadas en su interior. Los aspectos relacionados con el tamaño y forma de los árboles son igualmente importantes.

La progresión espacio-temporal de los trabajos de señalamiento dependerá luego de los métodos silvícolas y de ordenación aplicados y de los objetivos de la gestión. Tradicionalmente, la silvicultura y ordenación se han aplicado en España tomando como referencia el modelo de monte normal, esto es, un monte ideal donde las diferentes clases de edad se distribuyen equilibradamente (Madrigal, 1994). Sin embargo, el modelo de monte normal presenta varios inconvenientes y su utilidad está siendo revisada, principalmente tras la irrupción del criterio de sostenibilidad como nuevo paradigma de la gestión forestal (Tíscar, 2009; González *et al.*, 2006; García, 1995). El reto de los silvicultores actuales consiste en aprovechar los recursos forestales a la vez que se mantiene la biodiversidad y los bosques conservan su resiliencia y adaptabilidad en un mundo cambiante (Zavala *et al.*, 2004; Tíscar, 2006). La silvicultura de “cubierta continua” o “próxima a la naturaleza”

ha adquirido una gran difusión en este nuevo contexto de gestión forestal sostenible (Puettmann *et al.*, 2009; Pommerening y Murphy, 2004), si bien se inspira en la antigua idea del “bosque permanente” o *dauerwald*. En el bosque permanente, no se establece un turno definido o edad de madurez para cortar los árboles, sino que estos se mantienen en pie mientras que su crecimiento es vigoroso y no interfieren con otros árboles mejores (Hawley y Smith, 1982). Un aspecto particularmente destacable de la silvicultura próxima a la naturaleza es que resulta muy adecuada para el aprovechamiento de montes poco extensos, que es el caso de la mayor parte de los montes privados españoles.

En ausencia de un turno o edad de madurez, las cortas generan estructuras no regulares que pueden modelizarse mediante MCAI, ya que estos modelos de crecimiento funcionan en un amplio abanico de estructuras forestales (Monserud y Sterba, 1996); mientras que la utilidad de otros modelos (tablas de producción, por ejemplo) está restringida a las masas regulares que ocupan completamente el suelo (Madrigal *et al.*, 1999).

Los MCAI pueden orientar la decisión sobre qué árboles cortar durante la fase de señalamiento, pues son modelos de regresión múltiple, en donde el valor de cada uno de los parámetros ajustados y su contribución al porcentaje de varianza explicada se interpretan como una medida de la influencia de las variables explicativas sobre la variable respuesta: el crecimiento de los árboles. Además, las variables predictoras de estos modelos se escogen conforme al conocimiento biológico y algunas de ellas son directamente observables en los árboles. La calidad de estación, la edad, el tamaño y la competencia componen el conjunto de variables predictoras más frecuentemente utilizadas.

La calidad de estación está relacionada con propiedades físico-químicas del suelo influyentes en el crecimiento de las plantas (Bravo-Oviedo y Montero, 2005). La edad de los árboles se incluye como variable predictora, porque el crecimiento no es lineal y declina con la edad (Smith y Long, 2001). El tamaño actual constituye una buena variable predictora del crecimiento futuro, porque integra diferentes factores, tales como la habilidad

de los árboles para adquirir recursos (Wyckoff y Clark, 2005) y los efectos de la competencia pasada. Además, los árboles más grandes suelen ser también los de más edad y los parámetros de tamaño: diámetro, copa, altura, etc son fácilmente observables y medibles.

Finalmente, la competencia es una forma de interacción espacial, establecida entre los árboles cercanos o vecinos que se disputan los recursos del medio. La intensidad de esa interacción puede cuantificarse mediante "índices de competencia" (Álvarez *et al.*, 2003; Tomé y Burkhart, 1989) y, de este modo, introducirse como variable predictora en los MCAI. En su formulación más habitual, los índices consideran que la competencia experimentada por un árbol es tanto mayor cuanto más grandes y numerosos son sus vecinos, si bien, el efecto de la diferencia de tamaños sobre el crecimiento varía conforme las condiciones ambientales.

Se dice que la interacción de competencia es simétrica cuando todos los árboles compiten por igual o en proporción a sus respectivos tamaños, y asimétrica cuando los árboles grandes adquieren la mayor parte de los recursos para crecer a expensas de los individuos pequeños (Weiner y Thomas, 1986). Los términos competencia simétrica y competencia asimétrica constituyen los extremos de un continuo que puede variar en función de las condiciones ambientales. Así, se ha argumentado que los árboles responden plásticamente a las condiciones del medio, y compiten por la luz en los sitios ricos en nutrientes y por los nutrientes mismos en los sitios pobres (Coomes y Allen, 2007). Por su parte, el número de vecinos o competidores está determinado por el valor del radio óptimo de vecindad donde tiene lugar la interacción de competencia, pudiendo estimarse de diferentes formas (García-Abril *et al.*, 2007; Álvarez *et al.*, 2003).

Los objetivos de este trabajo fueron (i) investigar qué variables predictoras, observables por el selvicultor durante los trabajos de señalamiento, explican mejor la variabilidad del crecimiento en sección de una población de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, y (ii) explorar de qué modo esa información puede utilizarse para hacer selvicultura próxima a la naturaleza.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Especie y lugar de estudio

*Pinus nigra* subsp. *salzmannii* es una conífera propia de las montañas calizas orientales de la Península Ibérica. En la sierra de Cazorla (provincia de Jaén, sureste de España), recibe el nombre común de pino salgareño.

La zona de estudio se situó entre los 1450 y 1550 metros de altitud en un lugar conocido como Cañada del Espino dentro del monte Navahondona

de la sierra de Cazorla (37° 54'N - 2° 53'O, Figura 1). La estructura forestal de este lugar está formada por una mezcla heterogénea de rodales de diferente extensión, espesura y tamaño de los árboles integrantes. No se habían realizado tratamientos silvícolas durante los 15 años anteriores a la realización del estudio.

A partir de una regresión ajustada con datos altura-edad recabados durante la realización del inventario forestal del monte Navahondona en 1995, establecimos un índice de sitio promedio para la Cañada del Espino de 19,5 m a los 100 años (n= 30 árboles).

### 2.2. Obtención de datos

Los datos se obtuvieron a lo largo de un transecto tendido de lado a lado de la cañada, evitando el fondo y las zonas de cumbre, y siguiendo aproximadamente la línea de máxima pendiente. A intervalos de 20 m, se marcó el árbol más próximo perteneciente al estrato dominante (árbol de referencia en adelante) hasta completar una muestra de 60 pies en 1.200 m de transecto.

A cada árbol de referencia se le midió el diámetro normal ( $d$ ), la altura total ( $h$ ), la altura de la primera rama viva ( $h'$ ) y el área ocupada por la proyección vertical de la copa ( $AC$ ). Adicionalmente, en un único punto orientado hacia el sur y coincidiendo con el sentido de la curva de nivel, se extrajo con la barrena de Pressler un taco de madera que permitió estimar el crecimiento radial durante los últimos 5 años. También se midió el espesor de la corteza en el orificio de entrada de la barrena.

$AC$  se calculó midiendo dos radios de la copa según la curva de nivel y otros dos según la línea de máxima pendiente a uno y otro lado del tronco, y sumando las superficies de los cuatro cuartos de elipse resultantes, haciendo coincidir los semiejes con los radios medidos. Las alturas total y de la primera rama viva permitieron calcular la fracción de copa viva ( $FCV$ ), resolviendo la operación:  $(h - h')/h$ , donde  $h - h'$  es la profundidad de la copa ( $P$ ). También se calculó el coeficiente de esbeltez ( $E$ ), dividiendo  $h$  entre  $d_{inicial}$  (ver el párrafo siguiente).

Conocidos el crecimiento radial y el espesor de la corteza, se calcularon el crecimiento en sección normal sin corteza durante los últimos 5 años ( $CSN$ ) y el diámetro normal con corteza del árbol 5 años antes ( $d_{inicial}$ ). Puesto que el crecimiento de la corteza no puede estimarse retrospectivamente, el diámetro normal con corteza 5 años antes se estimó asumiendo que el porcentaje de corteza respecto al diámetro total había permanecido constante durante el período estudiado (Calama y Montero, 2005). El diámetro inicial, la altura total, el coeficiente de esbeltez, la profundidad de la copa y la fracción de copa viva constituyeron el

conjunto de variables de tamaño consideradas en este estudio.

Para evaluar la influencia de la competencia, se eligió una submuestra de 15 árboles de referencia intentando abarcar la variabilidad de estructuras observadas alrededor del total de 60 árboles estudiados. Los 15 árboles así elegidos se convirtieron en el centro de parcelas concéntricas de 5, 7,5, 10 y 15 m de radio que se utilizaron para estimar el efecto de la distancia en la interacción de competencia. Con estos datos se calcularon, para cada parcela concéntrica, los valores de los diferentes índices de competencia (*IC*) que aparecen reflejados en la Tabla 1. Se incluyeron tanto índices dependientes de la distancia: Hegyi y Pukkala-Kolstrom, como independientes: BAL, Lorimer Área y Daniels, según la distancia entre árboles interviniera en su cálculo o no. Obviamente, estos índices representan una pequeña fracción del elenco de índices de competencia disponibles en la bibliografía, pero están entre los más frecuentemente utilizados en los modelos de crecimiento y su formulación es intuitiva, resultando más útiles en el trabajo del selvicultor.

### 3. Metodología

#### 3.1. Análisis realizados

La influencia de las diferentes variables de tamaño sobre el crecimiento en sección de *Pinus nigra* se analizó mediante un modelo de regresión múltiple. Antes de ajustar el modelo, se realizó una exploración previa del conjunto de datos. Concretamente, se comprobó la normalidad de cada una de las variables mediante el test de Shapiro-Wilk, se dibujaron diagramas de dispersión de *CSN* con cada una de las posibles variables explicativas y se construyó una matriz de correlaciones de Spearman (Tabla 2). También se hizo un análisis de partición jerárquica (Figura 2) para cuantificar los efectos independientes y conjuntos de las posibles variables predictoras (Mac Nally, 2000).

A continuación, se ajustó el modelo incluyendo simultáneamente las seis variables consideradas ( $d_{inicial}$ ,  $h$ ,  $\text{LnFCV}$ ,  $\text{LnAC}$ ,  $\text{LnP}$ ,  $\text{LnE}$ ; se transformaron logarítmicamente las variables que no se distribuían normalmente). Este ajuste se realizó con la utilidad "Regresión en Cadena" del programa de ordenador Statgraphics Plus 5.1 (Martín *et al.*, 2001). El valor del parámetro de la cadena se estableció en 0. De esta forma, el programa realizó una regresión lineal mediante mínimos cuadrados ordinarios, controlando la colinealidad entre las variables independientes mediante el factor de inflación de la varianza (VIF). Se estableció *a priori* un valor máximo del VIF de 5 (Monserud y Sterba, 1996). La salida del ajuste así realizado mostró problemas graves de colinealidad.

Se han propuesto diferentes soluciones para afrontar el problema de la colinealidad entre variables independientes (Quinn y Keough, 2002). En este caso, optamos por la más simple y seleccionamos una de entre las variables más correlacionadas entre sí, es decir, el diámetro inicial frente al coeficiente de esbeltez y la fracción de copa viva frente a la profundidad de la copa. Esta solución se adoptó entendiéndose que dichas variables contenían información redundante y considerando cuáles serían más fáciles de estimar en las condiciones de campo, esas en que se realizan los trabajos de señalamiento. Por otra parte, también consideramos qué variables han sido más frecuentemente incluidas en otros modelos de crecimiento de *Pinus nigra* (Palahí y Grau, 2003; González-Molina *et al.*, 1999).

De esta forma, el modelo finalmente ajustado fue:

$$CSN = \beta_0 + \beta_1 d_{inicial} + \beta_2 h + \beta_3 \text{LnFCV} + \beta_4 \text{LnAC} \quad [1]$$

En donde, *CSN* representa el crecimiento en sección normal sin corteza durante los últimos cinco años, medido en  $\text{cm}^2$ ,  $d_{inicial}$  el diámetro normal inicial con corteza en  $\text{cm}$ ,  $h$  la altura total actual medida en  $\text{m}$ , *AC* la superficie actualmente ocupada por la proyección vertical de la copa en  $\text{m}^2$ , y *FCV* el porcentaje de la altura total del árbol ocupado por ramas vivas, en tanto por ciento.

La Tabla 3 muestra los principales estadísticos descriptores de las cuatro variables incluidas en el modelo [1].

Por su parte, la influencia de la competencia sobre el crecimiento en sección de la submuestra de 15 árboles se estudió ajustando para los cuatro radios de parcela considerados sucesivas regresiones alométricas de la forma:

$$\text{Ln}(CSN) = \beta_1 + \beta_2 \text{Ln}(IC) \quad [2]$$

Donde *IC* representa cada uno de los índices de competencia mostrados en la Tabla 1. Se anotaron los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y del error medio cuadrático (EMC), entendiéndose que el mejor índice era aquel que, resultando un parámetro de regresión significativamente distinto de cero, maximizaba  $R^2$  y minimizaba EMC. A todos los valores del índice BAL, se les sumó la cifra 1 para poder calcular los logaritmos neperianos, ya que en varias ocasiones el índice BAL tomó el valor 0.

Desde un punto de vista matemático, no es correcto relacionar el crecimiento del árbol de referencia con los tamaños actuales de los árboles vecinos, pues estas variables no son independientes entre sí y la independencia de las variables es una de las asunciones del análisis de regresión. En nuestro caso, ni disponíamos de medidas realizadas sobre los mismos árboles en momentos diferentes, ni podíamos perforar todos los árboles vecinos con barrena de Pressler. A modo de solución, dimos por válida la opinión de

Weiner (1984), para quien el error introducido de esta forma será asumible cuando el crecimiento durante el período considerado haya sido pequeño respecto del tamaño al principio de ese período. En cualquier caso, el tamaño de un árbol está altamente correlacionado con su tamaño en el pasado reciente, 5 años atrás en este estudio; sobre todo si no se han practicado claras en ese tiempo (Schöder *et al.*, 2002).

Consecuentemente, los índices de competencia formulados en función del diámetro se calcularon con el tamaño actual de los árboles vecinos, y con esos resultados se ajustó el modelo [2]. Otro tanto puede comentarse sobre el ajuste del modelo [1], que utilizó valores actuales de los parámetros altura, superficie de la copa y fracción de copa viva. Además, según las tablas de producción de Bautista *et al.* (2005), el crecimiento en altura de los árboles muestreados habría sido de unos 0,50 metros durante los últimos 5 años; este valor coincide con la precisión del hipsómetro empleado para medir la altura.

Todos los análisis se realizaron con el programa de ordenador Statgraphics Plus v.5.1 salvo la partición jerárquica, que se realizó con el módulo *hier.part* para R 2.7.0 (R Development Core Team, 2008, <http://www.r-project.org>).

#### 4. Resultados

El diámetro y el área de copa presentaron las correlaciones más altas con el crecimiento en sección normal (Tabla 2). Por su parte, la Tabla 4 muestra los resultados del ajuste del modelo de regresión [1]. Una regresión paso a paso hacia atrás (F para extraer = 4) generó el siguiente modelo final con el diámetro y el área de la copa como variables explicativas:

$$CSN = -52,74_{(47,84)} + 2,33_{(1,14)} \cdot d_{inicial} + 40,97_{(18,21)} \cdot \ln AC ;$$

$$F_{2, 57} = 13,84; p\text{-valor} < 0,0000$$

donde

$$\hat{e}_{(\sigma)} \begin{cases} \hat{e} & \text{Estimación del coeficiente} \\ \sigma & \text{Error medio de la estimación} \end{cases}$$

Aún más,  $\ln AC$  por sí sola aportó aproximadamente la misma cantidad de variación explicada ( $R^2 = 27,8\%$ ) que el diámetro inicial solo ( $R^2 = 26,7\%$ ), mientras que combinando las dos variables se produjo una mejora sustancial, incrementándose el coeficiente de determinación hasta el 32,69%.

El análisis gráfico de los residuos no indicó ningún incumplimiento de las hipótesis de normalidad y homocedasticidad. Los VIF estuvieron claramente por debajo de 5 indicando que no existían problemas de colinealidad entre las variables explicativas.

El diámetro inicial y el área de copa contribuyeron también con porcentajes altos en el análisis de partición jerárquica (Figura 2).

Por su parte, los resultados de la regresión ajustada al modelo [2] fueron congruentes con la lógica biológica. Los índices de competencia independientes de la distancia mostraron una mejor correlación con el crecimiento en sección en los cuatro radios de vecindad considerados (Tabla 5). El índice de Lorimer Área mostró un coeficiente de determinación y significación estadística mayores en todos los casos, salvo para una distancia de 5 m. En esta última situación, el índice BAL ofreció mejores resultados.

De entre los índices dependientes de la distancia, el índice de Hegyi mostró significación estadística para las parcelas de 10 y 15 m, pero no así para las parcelas de 5 y 7,5 m. Mientras que el índice de Pukkala-Kolström no explicó en ningún caso el crecimiento en sección de los árboles analizados.

Dejando aparte el índice BAL, la mayor intensidad de la competencia se produjo entre los 10 y 15 m de distancia, más o menos la mitad de la altura media de los árboles utilizados en el análisis.

#### 5. Discusión

##### 5.1. Influencia del tamaño

De entre todas las variables de tamaño consideradas en este estudio, únicamente el diámetro inicial y la proyección vertical de la superficie de la copa se incluyeron en el modelo final. El coeficiente de determinación de dicho modelo (32,69%) fue similar o superior al obtenido en otros modelos de crecimiento de *Pinus nigra*. Concretamente, Monserud y Sterba (1996) mencionan un  $R^2$  del 39,8% para el efecto combinado del diámetro y de la fracción de copa viva sobre el crecimiento en sección, aunque aclaran que *Pinus nigra* parece poco sensible a la fracción de copa viva y que, posiblemente, la anchura de la copa (o por extensión su área) pudiera ser más importante.

Los resultados de este estudio confirman esa apreciación, pues la fracción de copa viva no se correlacionó con el crecimiento, mientras que la superficie ocupada por la copa sí lo hizo significativamente. Las variables relacionadas con el tamaño de la copa constituyen una medida sustitutiva de la masa de hojas de los árboles, siendo esa la principal razón para incluirlas en los modelos de crecimiento. Consecuentemente, puede deducirse que la superficie de la copa representa la masa de hojas mejor que la fracción de copa viva en los pinos salgareños, quizás por la conformación general de la copa en dicha especie, o quizás por la particular arquitectura de los árboles estudiados (pertenecientes al estrato dominante).

Una copa más extensa puede indicar también una cantidad de espacio de crecimiento igualmente mayor y, de este modo, el área de la copa podría estar correlacionada con unas condiciones de competencia menos intensas tanto en el pasado (circunstancia probable), como durante el presente (circunstancia segura). Precisamente, la fracción de copa viva se ha usado como un parámetro adecuado para medir el efecto acumulado de la competencia durante la vida de los árboles (Schöder *et al.*, 2002). Nosotros hemos encontrado que los radios de la copa y no su profundidad en relación a la altura total integrarían mejor la competencia pasada en *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*.

No obstante, la falta de influencia de la fracción de copa viva sobre el crecimiento de los pinos examinados en este estudio podría obedecer a que todos los árboles pertenecieron al estrato dominante y, en esas condiciones, la proyección vertical de la superficie de la copa podría ser un mejor estimador de la cantidad de luz que incide sobre los pinos. La superficie de copa se ha correlacionado positivamente con el crecimiento de diferentes especies (Wyckoff y Clark, 2005), pero su medida resulta un tanto complicada. En cualquier caso, nuestros resultados coinciden con los de otros estudios sobre crecimiento de *Pinus nigra* (Meya *et al.*, 2001).

A diferencia de la superficie de la copa, el diámetro es fácil de medir. Los resultados mostraron una correlación moderada tanto con la superficie de la copa, como con el crecimiento en sí de los ejemplares de *Pinus nigra* examinados. De este modo, el diámetro podría observarse como un parámetro suficiente para predecir el crecimiento futuro de los pinos salgareños, aunque debe esperarse más crecimiento en los árboles con mayor superficie de copa a igualdad de diámetros.

Dentro del rango de diámetros estudiados, la respuesta del crecimiento fue completamente lineal. El ajuste lineal ofreció mejores resultados que uno logarítmico, y un ajuste polinómico de orden 2 sobre la relación crecimiento-diámetro tampoco aportó ninguna mejora. Dado que el árbol más grueso de los estudiados tuvo un diámetro de 64 cm, cabe preguntarse sobre la poca adecuación de la edad de madurez actual de los pinos salgareños, fijada en 120 años según un criterio de máxima renta en volumen; principalmente, porque a partir de esa edad se añade al fuste la madera de mejor calidad (Gómez-Loranca, 1996). A este respecto, Tíscar (2004) considera que los pinos salgareños necesitan unos 225 años para alcanzar los 65 cm de diámetro normal en la zona de estudio.

### 5.2. Influencia de la competencia

Los índices de competencia formulados en función del diámetro e independientes de la distancia

fueron mejores a la hora de detectar la interacción de competencia. En particular, los índices de Lorimer Área y BAL mostraron el mayor coeficiente de determinación y el menor error medio cuadrático en todos los ajustes realizados. Este resultado vino a coincidir con el de otros estudios de evaluación de índices de competencia (por ejemplo Vayreda *et al.*, 1994; Álvarez *et al.*, 2003; Castagneri *et al.*, 2007), aunque dichos trabajos utilizaron parcelas de estructura regular únicamente. La información aportada por las distancias entre árboles puede resultar redundante en las masas regulares una vez que se conocen su densidad y área basimétrica (Cole y Lorimer, 1994), pero no así en las irregulares, donde el ritmo de crecimiento y las relaciones de competencia por la luz y los nutrientes varían más entre árboles.

Las parcelas del presente trabajo pertenecieron a un amplio rango de estructuras, situándonos en un estudio de competencia de masas irregulares. Por ello, se habría esperado una mayor eficacia de los índices dependientes de la distancia. No obstante, García-Abril *et al.* (2007) encontraron que los índices independientes de la distancia son buenos predictores del crecimiento tanto en masas regulares como irregulares y, en cualquier caso, el índice de Hegyi fue capaz de cuantificar la competencia entre pinos vecinos.

No ocurrió así con el de Pukkala y Kolström, que también es dependiente de la distancia, aunque formulado en función de la altura y no del diámetro. Este resultado era esperado en parte, porque los árboles de referencia pertenecieron siempre al estrato dominante. Esta circunstancia jugó en contra de la eficacia del índice de Pukkala y Kolström por dos razones: (i) resultaba menos probable que los árboles de referencia fueran sombreados por árboles vecinos y (ii) los índices sólo detectan la competencia cuando hay una variación suficiente de los parámetros (alturas en este caso) alrededor del árbol de referencia. A este respecto, debemos reconocer las limitaciones de discutir los resultados de nada más que 15 parcelas de estudio.

Los resultados de la Tabla 5 sugieren que el radio de vecindad para la máxima influencia significativa de la competencia sobre el crecimiento en sección se situó entre los 10 y 15 metros. Esto establece el radio de vecindad en más o menos la mitad de la altura de los árboles de referencia que, debe recordarse, pertenecían al estrato dominante. También se deja entrever que el criterio de selección de competidores de Biging y Dobbertin (Álvarez *et al.*, 2003) puede resultar adecuado en las condiciones de las masas de pino salgareño.

La Tabla 5 sugiere igualmente que existe competencia tanto por la luz, medida por el índice BAL en las parcelas de menor radio, como por los

recursos del suelo, según indica el índice de Lorimer Área en las parcelas de mayor radio (Ledermann y Stage, 2001). Efectivamente, este último índice contabiliza la acción combinada de todos los árboles vecinos, incluyendo los pies que por ser más bajos que el de referencia tienen un peor acceso a la luz (asumimos que los árboles gruesos son, en general, más altos, aunque el coeficiente de correlación para las variables diámetro-altura fue de 0,48). Obviamente, los nutrientes del suelo influyen sobre el crecimiento de las plantas, pero el recurso agua es tanto o más importante en las condiciones mediterráneas e influye definitivamente en el crecimiento de los pinos salgareños (Linares y Tíscar, 2010).

La preponderancia de la competencia por los recursos del suelo es una característica de la competencia simétrica (Newton y Jolliffe, 1998), que se supone más intensa en los lugares con una mayor limitación de nutrientes (Coomes y Allen, 2007) y, añadimos nosotros, también con limitación por agua (Linares y Tíscar, 2010). Puesto que es posible establecer correlaciones entre las variables edáficas y la calidad de estación (Bravo-Oviedo y Montero, 2005).

Aún más, la existencia de una competencia de naturaleza simétrica era esperada en el lugar de estudio, puesto que su calidad de estación se situó en una posición intermedia dentro de las calidades definidas por Bautista *et al.* (2005).

A modo de conclusión, puede decirse que el diámetro, la superficie ocupada por la proyección de la copa y los índices de competencia independientes de la distancia constituyen el conjunto de variables sobre las que desarrollar un MCAI para los pinares de salgareño. Queda por comprobar el verdadero efecto de la fracción de copa viva sobre el crecimiento, sobre todo tras la realización de cortas (Meya *et al.*, 2001), y confirmar la menor utilidad de los índices de competencia dependientes de la distancia aumentando el tamaño de la muestra de estudio.

### 5.3. Aplicación silvícola

Las posibilidades de la selvicultura próxima a la naturaleza eran ya conocidas por los forestales españoles de principios del siglo XX, pero no ha sido hasta los últimos años que está adquiriendo difusión (Barcenilla *et al.*, 2005; Tíscar, 2008). La selvicultura próxima a la naturaleza considera al árbol o grupo de árboles como unidad de gestión y entiende que un árbol no debe cortarse mientras siga acumulando valor dinerario o realice alguna función (García-Abril y Grande, 2005). Al no definirse de antemano el momento de corta de los árboles, la selvicultura próxima a la naturaleza conduce a la irregularidad de la estructura forestal con tres consecuencias de interés para el propietario particular: el aprovechamiento de los árboles maduros puede retrasarse, si las

condiciones de mercado no son buenas; puede cosecharse madera cada poco tiempo incluso en montes de poca extensión; y los gastos en regeneración o en claras son prácticamente inexistentes. Todo ello podría contribuir a que esa importante extensión de montes particulares y poca superficie, y que al día de hoy no tienen ninguna gestión, reciba la atención de sus propietarios, contribuyendo al desarrollo del mundo rural.

A lo largo de este trabajo, hemos defendido que los parámetros de regresión asociados a las variables independientes de los MCAI pueden orientar la realización de tratamientos silvícolas. Esto resulta obvio en el caso de la selvicultura próxima a la naturaleza, que trabaja a la escala del árbol o grupo de árboles. Particularmente, las variables de tamaño, que son directamente observables sobre los árboles, y las de competencia, que permiten establecer radios óptimos de vecindad, son útiles para responder a algunas preguntas básicas de la selvicultura de masas irregulares: ¿de qué árboles se espera un buen crecimiento durante los próximos años y es conveniente mantenerlos para que incrementen su valor económico? y ¿cómo se favorece el crecimiento de los árboles mejores?

Los pinares de salgareño se han tratado tradicionalmente como masas irregulares, llevando a cabo una selección positiva de los pies con cortas de mejora y la aplicación de un criterio diamétrico para identificar los pies maduros. A menudo, también se han cortado árboles inmaduros y bien conformados, vinculando esa decisión a la realización de cortas de liberación. Sin embargo, el mantenimiento indefinido de los árboles gruesos, bien conformados y vitales debería primarse en el nuevo contexto que impone la gestión forestal sostenible (Tíscar, 2006).

Los resultados de este estudio indican que la vitalidad de los pinos salgareños se mantiene hasta más allá de los 60 cm de diámetro y, por tanto, mucho más tiempo de los 120 años prefijados como edad de madurez por el criterio de cortabilidad actual.

La evidencia de que los pies de *Pinus nigra* compiten por los recursos de manera simétrica justifica la realización de claras por lo bajo, pero la información obtenida (radio de vecindad, efecto del diámetro y de la anchura de la copa sobre el crecimiento) es más útil para la ejecución de claras con selección de árboles de porvenir. De hecho, lo expuesto hasta ahora nos inclina a recomendar las claras mediante selección de árboles de porvenir en los montes de la zona de estudio.

## 6. Conclusiones

Los pies de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* siguen siendo vitales aún después de alcanzar grandes dimensiones y crecen a buen ritmo si disponen de

espacio para desarrollar sus copas. Sobre estos supuestos, se puede recomendar una silvicultura centrada en árboles individuales y orientada a la producción de madera de calidad (silvicultura próxima a la naturaleza) que permitiría: (i) programar las cortas dependiendo de las condiciones del mercado, (ii) generar una estructura forestal no regular para cosechar madera cada poco tiempo, (iii) y reducir los gastos en regeneración o claras. Todo ello resultaría particularmente interesante en montes de poca extensión, que viene a ser la situación más común en los montes de titularidad privada.

## 7. Agradecimientos

La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía dispuso los medios para la realización del presente trabajo.

## Referencias

- Alvarez, M.F., Barrio, M., Gorgoso, J., Alvarez, J.G. 2003. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. Invest. Agrar., Sist. Recur. For. 12: 25-35
- Bautista, R., Río, M., Grau, J.M., Montero, G. 2005. Tablas de producción de silvicultura variable para las masas de *Pinus nigra* Arn. en la sierra de Cazorla, Segura y Las Villas. En: Grande M.A. y García-Abril A. (coord.). Los pinares de *Pinus nigra* Arn. en España: ecología, uso y gestión, Fundación Conde del Valle de Salazar: 559-584
- Barcenilla, C., García, M.D., Garitacelaya, J., Garrote, J., Valle, J. 2005. El papel de la silvicultura próxima a la naturaleza en la problemática actual de la gestión forestal. 4º Congreso Forestal Español, Zaragoza, SECF
- Bravo-Oviedo, A., Montero, G. 2005. Site index in relation to edaphic variables in stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in south west Spain. Ann. For. Sci. 62: 61-72
- Calama, R., Montero, G. 2005. Multilevel linear mixed model for tree diameter incremental in Stone pine (*Pinus pinea*): a calibrating approach. Silva Fennica 39: 37-54
- Castagneri, D., Vacchiano, G., Lingua, E., Motta, R. 2007. Analysis of intraspecific competition in two subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands in Paneveggio (Trento, Italy). Forest Ecology and Management 255: 651-659
- Cole, W.G., Lorimer, C.G. 1994. Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwood stands. Forest Ecology and Management 67: 159-175
- Coomes, D.A., Allen, R.B. 2007. Effects of size, competition and altitude on tree growth. Journal of Ecology 95: 1084-1097
- García, J.M. 1995. Evolución de un medio forestal intervenido. Un siglo de ordenación en el pinar de Navafría (1895-1994). Revista Montes 36: 58-64
- García-Abril, A.D., Grande, M.A. 2005. Aplicación de la silvicultura detallada a escala árbol y la gestión del monte irregular para el *Pinus nigra* Arn. En: Los pinares de *Pinus nigra* Arn. en España: ecología, uso y gestión. Fundación Conde del Valle de Salazar: 233-258
- García-Abril, A., Martín-Fernández, S., Grande, M.A., Manzanera, J.A. 2007. Stand structure, competition and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in a Mediterranean mountainous environment. Ann. For. Sci. 64: 825-830
- Gómez-Loranca, J.A. 1996. *Pinus nigra* Arnold en el sistema Ibérico: Tablas de crecimiento y producción. Monografía del INIA 93, MAPA, Madrid
- González, J.M., Meya, D., Arrufat, D. 1999. Primeras tablas de silvicultura a la carta para masas regulares de *Pinus nigra* Arn. del prepirineo. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 8: 49-61
- González, J.M., Piqué, M., Vericat, P. 2006. Manual de ordenación por rodales. Gestión multifuncional de los espacios forestales. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona
- Hawley, R.C., Smith, D.M. 1982. Silvicultura práctica. Omega 544
- Ledermann, T., Stage, A.R. 2001. Effects of competitor spacing in individual-tree indices of competition. Can. J. For. Res. 31: 2143-2150
- Linares, J.C., Tíscar, P.A. 2010. Climate change impacts and vulnerability of the southern populations of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. Tree Physiology
- Madrigal, A., Alvarez, J.G., Rodríguez, R., Rojo, A. 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid
- Mac Nally, R. 2000. Regresión and model-building in conservation biology, biogeography and ecology: The distinction between –and reconciliation of– “predictive” and “explanatory” models. Biodiversity and Conservation 9: 655-671
- Martín, S., Ayuga, E., González, C., Martín, A. 2001. Guía completa de Statgraphics Plus, desde MS-Dos a Statgraphics Plus. Editorial Díaz de Santos, Madrid
- Meza, D., González, J.M., Aunós, A. 2001. Evolución del crecimiento radial en un rodal adulto de *Pinus nigra* Arn. de la provincia de Lleida. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 10: 95-110



- Monserud, R.A., Sterba, H. 1996. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management* 80: 57-80
- Newton, P.F., Jolliffe, P.A. 1998. Assessing processes of intraspecific competition within spatially heterogeneous black spruce stands. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 259-275
- Palahí, M., Grau, J.M. 2003. Preliminary site index model and individual-tree growth and mortality models for black pine (*Pinus nigra* Arn.) in Catalonia (Spain). *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 12: 137-148
- Pommerening, A., Murphy, S.T. 2004. A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. *Forestry* 77: 27-44
- Quinn, G.P., Keough, M.J. 2002. *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press.
- Puettmann, K.J., Coates, K.D., Messier, C. 2009. *A critique of silviculture. Managing for complexity*. Island Press.
- Schöder, J., Rodríguez, R., Vega, G. 2002. An age-independent basal area increment model for maritime pine trees in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management* 157: 55-64
- Smith, F.W., Long, J.N. 2001. Age-related decline in forest growth: an emergent property. *Forest Ecology and Management* 144: 175-181
- Tíscar, P.A. 2004. Estructura, regeneración y crecimiento de *Pinus nigra* en el área de reserva Navahondona-Guahornillos (sierra de Cazorla, Jaén). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid
- Tíscar, P.A. 2006. La gestión próxima a la naturaleza en el nuevo paradigma de la ciencia forestal. En Tíscar P.A. (coord.): *La Gestión Forestal Próxima a la Naturaleza*. Prosilva: 15-39
- Tíscar, P.A. 2008. A xestión forestal próxima á natureza como método de xestión sustentable. *Ambientalmente Sustentable: Revista científica galego-lusófona de educación ambiental* 6: 21-38
- Tíscar, P.A. 2009. Condiciones de Referencia preliminares para la gestión forestal sostenible de las masas de *Pinus nigra* en el macizo Cazorla-Segura. En: *Actas del 5º Congreso Forestal, Ávila, SECF*
- Tomé, M., Burkhart, H.E. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science* 35: 816-831
- Vayreda, J., Burriel, J.A., Raventós, J., Gracia, C. 1994. Variabilidad en el crecimiento de *Pinus sylvestris* en función de su edad y tamaño y de la competencia local. *Studia Oecologica* 10/11: 373-384
- Weiner, J. 1984. Neighbourhood interference amongst *Pinus rigida* individuals. *Journal of Ecology* 72: 183-195
- Weiner, J., Thomas, S.C. 1986. Size variability and competition in plant monocultures. *Oikos* 47: 211-222
- Wyckoff, P.H., Clark, J.S. 2005. Tree growth prediction using size and exposed crown area. *Can. J. For. Res.* 35: 13-20
- Zavala, M.A., Zamora, R., Pulido, F., Blanco, J.A., Bosco, J., Marañón, T., Gastillo, F.J., Valladares, F. 2004. Nuevas perspectivas en la conservación, restauración y gestión sostenible del bosque mediterráneo. En: Valladares, F. (ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente: 509-529

Tabla 1. Expresión matemática de los índices de competencia estudiados

Nombre del índice	Expresión
Área basimétrica de los árboles mayores (BAL)	$\sum_{i=1}^N \frac{\pi \times d_{\text{mayor } i}^2}{4}$
Lorimer Área (Vayreda <i>et al.</i> , 1994)	$\sum_{j=1}^N \frac{A.B.j}{A.B.i}$
Daniels <i>et al.</i> (1986)	$\frac{d_i^2 \times n}{\sum_{i \neq j} d_j^2}$
Hegyí (1974)	$\sum_{i \neq j} \frac{d_j}{d_i \times \text{Dist}_{ij}}$
Pukkala y Kolström (1987)	$\sum_{i \neq j} \frac{h_i}{h_j \times \text{Dist}_{ij}}$

$d_{\text{mayor } i}$ : diámetro normal de los árboles mayores que el árbol control (cm); A.B.j: área basimétrica del árbol vecino j (cm<sup>2</sup>); A.B.i: área basimétrica del árbol de referencia (cm<sup>2</sup>);  $d_j$ : diámetro normal del árbol vecino j (cm);  $d_i$ : diámetro normal del árbol de referencia (cm);  $\text{Dist}_{ij}$ : distancia en proyección horizontal entre el árbol de referencia y el vecino j (m); n: número de vecinos;  $h_i$ : altura total del árbol de referencia (m);  $h_j$ : altura total del árbol vecino j (m).

Tabla 2. Correlaciones de Spearman entre las variables analizadas

	diámetro	altura	esbeltez	prof. copa	FCV	área copa
<b>crecimiento</b>	0,474 (0,0003)	0,130 (0,3171)	-0,426 (0,0011)	0,171 (0,1882)	0,063 (0,6278)	0,532 (0,0000)
<b>diámetro</b>		0,436 (0,0008)	-0,742 (0,0000)	0,329 (0,0115)	0,113 (0,3864)	0,698 (0,0000)
<b>altura</b>			0,218 (0,0944)	0,437 (0,0008)	-0,057 (0,6637)	0,253 (0,0523)
<b>esbeltez</b>				-0,006 (0,9659)	-0,114 (0,3820)	-0,551 (0,0000)
<b>prof. copa</b>					0,849 (0,0000)	0,320 (0,0139)
<b>FCV</b>						0,221 (0,0901)

N= 60. Entre paréntesis se representa el p-valor.

Tabla 3. Valores medio, desviación típica y rango de las variables medidas en los 60 árboles de referencia

riable	Media	Desviación típica	Rango
Diámetro (cm)	43,69	9,32	23,5 – 64,4
Altura (m)	21,49	3,19	14,5 – 28,0
Área copa (m <sup>2</sup> )	37,22	19,97	8,53 – 82,06
Fracción copa viva (%)	51	13	29 – 88

Tabla 4.- Resultados del modelo de regresión múltiple

Variable dependiente: CSN						
Variable	Estimación	Error estándar	t	p-valor	VIF	
T. indep.	52,112	141,036	0,369	0,713		
<i>d</i>	2,610	1,239	2,104	0,040	2,083	
<i>h</i>	-2,481	2,896	-0,857	0,395	1,333	
Ln (FCV)	-19,163	33,011	-0,581	0,564	1,111	
Ln (AC)	44,439	19,163	2,323	0,024	1,953	

Análisis de varianza						
Fuente	SC	GI	MC	F	p-valor	R <sup>2</sup>
Modelo	106147	4	26537	7,02	0,0001	0,3381
Residuos	207827	55	3779			
Total	313974	59				

Tabla 5.- Coeficiente de determinación y Error Medio Cuadrático de las regresiones alométricas ajustadas para cada uno de los radios de parcela considerados.

Índice compet.	Radio 5 m		Radio 7,5 m		Radio 10 m		Radio 15 m	
	R <sup>2</sup>	EMC	R <sup>2</sup>	EMC	R <sup>2</sup>	EMC	R <sup>2</sup>	EMC
BAL	<b>0,584</b> <sup>***</sup>	<b>0,231</b>	0,294 <sup>*</sup>	0,390	0,384 <sup>*</sup>	0,340	0,170	0,458
Lorimer área	0,178	0,454	<b>0,414</b> <sup>**</sup>	<b>0,324</b>	<b>0,501</b> <sup>**</sup>	<b>0,276</b>	<b>0,420</b> <sup>**</sup>	<b>0,320</b>
Daniels <i>et al.</i>	0,281 <sup>*</sup>	0,397	0,266 <sup>*</sup>	0,405	0,361	0,353	0,324 <sup>*</sup>	0,373
Hegyí	0,057	0,527	0,241	0,419	0,333 <sup>*</sup>	0,369	0,327 <sup>*</sup>	0,372
Pukkala y K.	0,046	0,527	0,048	0,526	0,013	0,545	0,012	0,546

\* p-valor < 0,05. \*\* p-valor < 0,01. \*\*\* p-valor < 0,001. En negrita el mejor resultado para cada distancia.

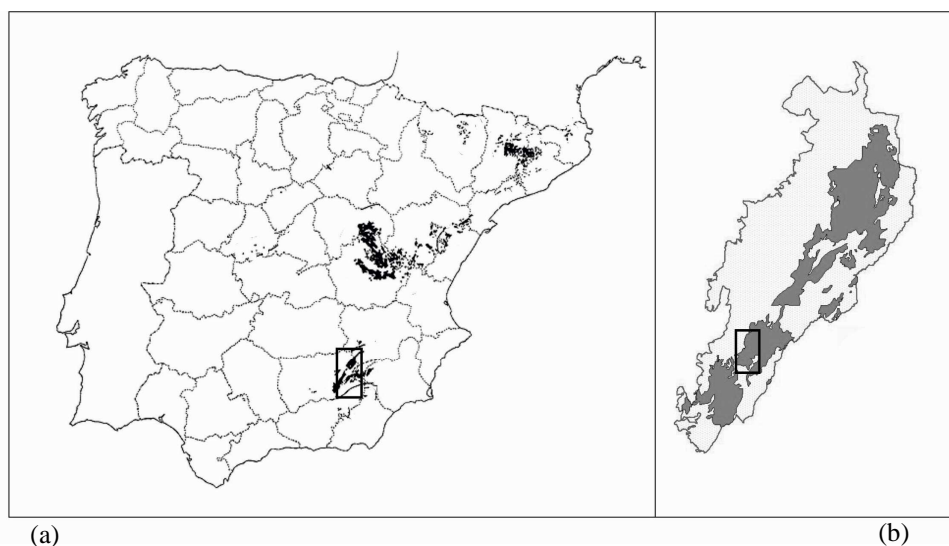


Figura 1. (a) Área de distribución natural de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* en España. Enmarcada la situación del Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas. (b) Área de distribución de las masas de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* en el Parque Natural de Cazorla, Segura y Las Villas. Enmarcada la situación de la zona de estudio en el monte Navahondona.

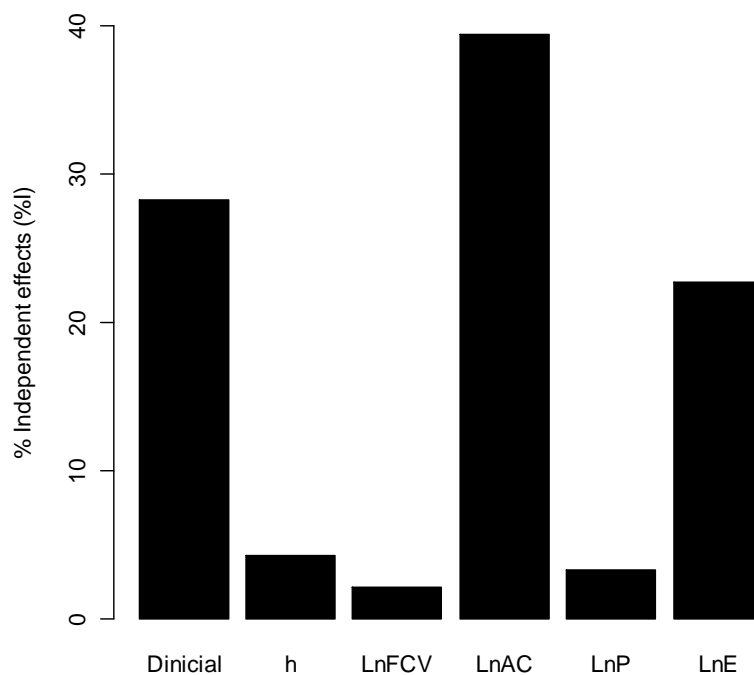


Figura 2. Partición jerárquica del modelo inicial. Las barras muestran el efecto relativo independiente de cada variable predictora sobre el crecimiento en sección de *Pinus nigra*