

¿ES EL ÍNDICE DE SITIO UN ESTIMADOR DE LA PRODUCCIÓN VÁLIDO EN EL MARCO DEL CAMBIO CLIMÁTICO?

Miren del Río Gaztelurrutia^{1,2}, Andrés Bravo-Oviedo^{1,2} y Dario Martín-Benito^{1,3}

¹Departamento de Selvicultura y Gestión de Sistemas Forestales, CIFOR-INIA, Crta. La Coruña, km 7,5. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: delrio@inia.es

²Instituto Universitario de Investigación Gestión Forestal Sostenible, UVa-INIA. CIFOR-INIA, Crta. La Coruña, km 7,5. 28040-MADRID (España)

³Tree-Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University. PALISADES (NY 10964, USA)

Resumen

El índice de sitio, definido como la altura dominante de un rodal a una edad de referencia, ha sido utilizado tradicionalmente como un estimador de la calidad de estación. Estimar la calidad de estación es importante ya que ésta condiciona el crecimiento y estructura del rodal, y por lo tanto la elección de tratamientos selvícolas, además de estar directamente relacionada con la productividad. En este trabajo se presentan algunas consideraciones sobre el índice de sitio con el fin de discutir su utilidad en un escenario de cambio climático. En primer lugar se analiza la relación producción-índice de sitio. Seguidamente se revisa la variabilidad espacial y temporal del crecimiento en altura dominante observada en algunas especies, para terminar con la variabilidad temporal de la calidad de estación. Estas variaciones implican, por una parte, que no existe una relación unívoca entre producción e índice sitio y, por otra, que un mismo valor del índice de sitio puede expresar distintos patrones de crecimiento y, por lo tanto, distintas producciones a lo largo del desarrollo del rodal. Finalmente, se presentan algunas consideraciones sobre el uso del índice de sitio en la gestión forestal, así como en la modelización forestal en un marco de cambio global.

Palabras clave: *Calidad de estación, Altura dominante, Cambio global, Adaptación*

INTRODUCCIÓN

La calidad de estación se puede definir como “la producción potencial de madera de una estación para una especie y tipo de bosque dado” (CLUTTER *et al.*, 1983), por lo que solo tiene sentido en relación a una especie en una localización determinada. La estrecha relación entre el desarrollo de la altura dominante y la producción en volumen, de acuerdo con la ley de Eichhorn de 1904, generalizada por Gehrhardt en 1909 (ASSMANN,

1970), conduce a que el índice de sitio, definido como la altura dominante de un rodal a una edad de referencia, se haya utilizado como una aproximación de la producción en volumen (VANCLAY, 1994). El uso del índice de sitio como estimador de la calidad de estación lleva a la concepción de clases de calidad en función de la altura (VON BAUR, 1881 en ASSMANN, 1970).

La construcción de curvas de calidad de estación o de evolución de la altura dominante con la edad de un rodal ha sufrido un gran desarrollo

desde los comienzos de la modelización forestal. Los avances alcanzados han permitido una gran flexibilidad y complejidad de las expresiones matemáticas de las funciones de crecimiento en altura dominante, cuyas propiedades deseables son (GOELZ & BURK, 1992): punto de inflexión, asíntota horizontal, polimorfismo e invariabilidad respecto a la edad de referencia y al intervalo de proyección. BAILEY & CLUTTER (1974) identificaron la forma de obtener un sistema de curvas de calidad con independencia de la edad de referencia mediante el método de ecuaciones en diferencias algebraicas (popularizado por su acrónimo en inglés ADA). Este procedimiento lleva a un patrón de crecimiento que, aunque polimórfico, genera una asíntota común en la mayor parte de modelos, lo que puede interpretarse como una discrepancia con un comportamiento biológico lógico. CIESZEWSKI & BAILEY (2000) desarrollaron el método o aproximación generalizada en diferencias algebraicas (GADA por su acrónimo en inglés), que aumenta la flexibilidad del modelo y permite un patrón polimórfico tipo I, en el que el crecimiento es diferente entre índices de sitio, o tipo II, en el que se permite tener diferentes patrones de crecimiento para un mismo índice de sitio (KRUMLAND & ENG, 2005), con asíntota variable.

En la gestión forestal es necesario clasificar los rodales en calidades de estación, ya que tanto la dinámica y estructura de los mismos como su productividad, dependen de esta calidad. Debido a la disponibilidad de curvas de calidad de estación para muchas de las especies forestales y regiones (ver por ejemplo el caso de España en BRAVO *et al.*, 2011), esta clasificación se realiza generalmente mediante el índice de sitio. Cuando clasificamos la productividad de los rodales forestales de acuerdo al valor del índice de sitio se está asumiendo que no hay variabilidad en:

- a) la relación producción-índice de sitio
- b) el patrón de crecimiento en altura
- c) la calidad de estación

Estas hipótesis de partida no son siempre ciertas, existiendo cierta variabilidad en los tres puntos mencionados, por lo que es necesario matizar el uso del índice de sitio y reflexionar sobre las posibles repercusiones en la gestión y en la modelización forestal. A continuación se repasan estas tres hipótesis de uso del índice de sitio.

RELACIÓN PRODUCCIÓN-ÍNDICE DE SITIO

Como se ha comentado, el uso del índice de sitio como estimador de la productividad se basa en los principios de la producción forestal. El primer principio es precisamente el de clasificación de la calidad de estación en función de la altura. La primera referencia al uso de la altura a una edad dada, conocido como índice de calidad o índice de estación, se debe a De Perthuis en el siglo XVIII (BATHO & GARCÍA, 2006), aunque su uso reglado no comienza hasta mediados del siglo XIX. A finales del siglo XIX se generalizó su uso en Centroeuropa y poco después en Norte América, pasando a ser uno de los pilares fundamentales del conocimiento sobre el crecimiento forestal (SKOVSGAARD & VANCLAY, 2008). El segundo principio o ley de Eichhorn, ya mencionado, establece que la producción en volumen de una especie es función de la altura del rodal (una misma altura se alcanza a distintas edades según la calidad de estación, pero con similar volumen en todas las calidades) (ASSMANN, 1970), y ha conllevado el uso generalizado del principio de clasificación de la calidad de estación en función de la altura.

Según la ley de Eichhorn la producción no depende del espaciamiento inicial, claras aplicadas, etc., pero los datos observados en ensayos de claras llevaron a matizar esta ley y formular el tercer principio de la producción forestal, conocido también como hipótesis de Wiedemann (ASSMANN, 1970) o curva de Langsæter (DANIEL *et al.*, 1979). Este principio establece que las claras no afectan a la producción en un amplio rango de densidades, es decir, que dentro de ciertos límites la producción depende solo de la altura dominante. No obstante, existen numerosos trabajos que indican que este rango de densidad varía entre especies y calidades de estación (ASSMANN, 1970), con resultados contradictorios en la literatura (HASENAUER *et al.*, 1997; ZEIDE, 2001). Como ejemplo, para los pinares españoles de *Pinus sylvestris* L. la aplicación de claras fuertes por lo bajo conllevó pérdidas del 18% en crecimiento en volumen con respecto a masas no intervenidas (Río *et al.*, 2008) (Figura 1).

Por otra parte, se ha demostrado en varios trabajos que para una misma selvicultura existe variación dependiente de la estación en la produc-

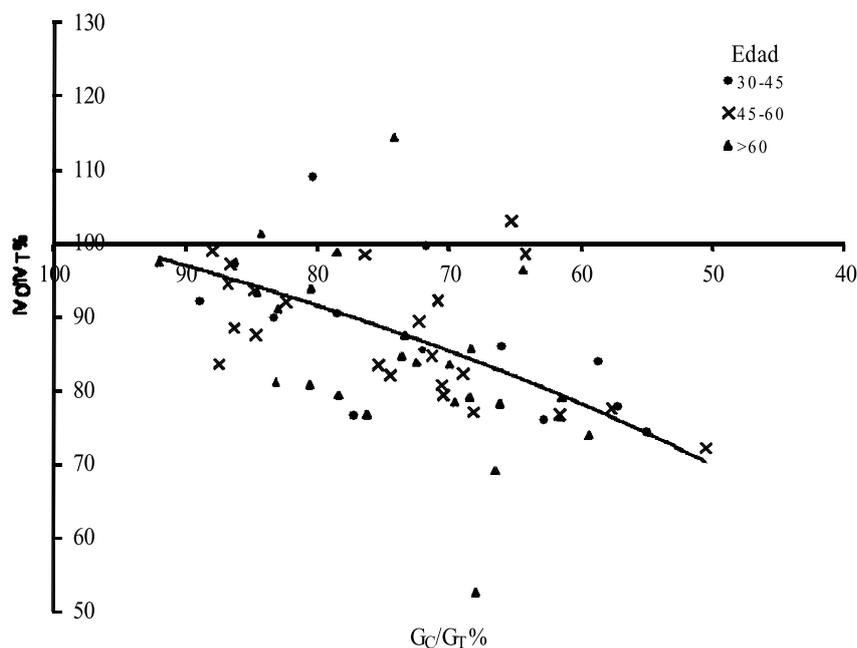


Figura 1. Relación entre el incremento de volumen en parcelas aclaradas con respecto a parcelas no aclaradas o testigos (IV_c/IV_n) y el área basimétrica en parcelas aclaradas con respecto a parcelas no aclaradas (G_c/G_T) por grupos de edades: 30-45 años, 45-60 años de edad, >60 años de edad, encontrada en ensayos de claras de *Pinus sylvestris*. La línea continua es la línea de tendencia de todos los datos

ción total a una altura dada (SKOVSGAARD & VANCLAY, 2008). ASSMANN (1970) definió la relación entre volumen y altura como *nivel de producción general*, y a esta variación dependiente del sitio como *niveles de producción específicos*. Estos niveles de producción específicos se traducen en trayectorias diferentes en la relación volumen total-altura dominante. Las tablas de producción inglesas consideran estos niveles de producción (HAMILTON & CHRISTIE, 1971), pero en general el concepto de niveles de producción se ha omitido en la mayor parte de estudios de crecimiento y producción fuera de Centroeuropa, incluyendo los estudios españoles.

Si se considera esta variación en la producción, bien debida a las claras aplicadas (hipótesis de Wiedemann) o bien a los niveles de producción, no se puede generalizar la relación directa entre producción en volumen y altura dominante que establece la Ley de Eichhorn y, por lo tanto, tampoco la relación producción-índice de sitio.

CRECIMIENTO EN ALTURA DOMINANTE

El patrón de crecimiento en altura dominante de las masas forestales presenta cierta variabili-

dad espacial y temporal que ha de tenerse en cuenta y que dificulta el uso del índice de sitio como indicador de la producción. El crecimiento en altura dominante sigue un patrón general sigmoideo que sufre variaciones como consecuencia de diferencias en los factores que afectan al crecimiento, tanto más acusados cuanto más variación existe. Dichos factores son específicos de cada una de las estaciones o sitios y se componen de condiciones climáticas, edáficas y fisiográficas (BARNES *et al.*, 1997), haciendo que un rodal se desvíe de la tendencia general esperada (GARCÍA, 2006). El crecimiento en altura, además, está condicionado a dos periodos de crecimiento en especies con crecimiento monopódico y brotes preformados, uno cuando se forma la yema terminal y otro cuando se produce la elongación del brote, lo que atempera las fluctuaciones climáticas interanuales, por lo que el patrón de crecimiento medio es consecuencia de las condiciones meteorológicas “medias” de la estación (OLIVER & LARSON, 1996). Diferencias en las condiciones medias meteorológicas y en otros factores hacen que el patrón de crecimiento no sea constante dentro de una misma calidad de estación (polimorfismo tipo II). Si se quiere considerar esta variabilidad en la clasificación en

calidades de estación, el sistema de curvas de calidad debe ser capaz de recoger este polimorfismo. No obstante, la precisión requerida en la estimación del índice de sitio en muchos usos no hace necesaria esta consideración.

La incorporación de la variabilidad local, asociada al clima y otros factores, puede lograrse mediante modelos de estructura estocástica que incluyan variabilidad temporal y errores de medición (GARCÍA, 2006). Esta estructura puede obtenerse incorporando un proceso aleatorio o “ruido ambiental” en una ecuación diferencial (GARCÍA, 1983) o mediante la formulación de un modelo mixto, en el que los parámetros constan de una parte fija y otra aleatoria que varíe dentro de una población (LAPPI & BAILEY, 1988). Por otra parte, el polimorfismo tipo II puede describirse mediante otras metodologías (KRUMLAND & ENG, 2005), bien ajustando ecuaciones para una especie en diferentes áreas geográficas y comprobando la igualdad de parámetros (CALAMA et al., 2003) o desarrollando directamente ecuaciones diferentes para cada zona, o bien ampliando el número de parámetros del modelo que incorporan variables explicativas que informan, por ejemplo, sobre tipos de hábitat (MONSERUD, 1984) o de valores de clima (WOOLLONS et al., 1997).

El polimorfismo es una propiedad del crecimiento de las masas forestales que puede ser más o menos patente en función de las especies y de las condiciones ambientales, sobre todo de las edáficas (BARNES et al., 1997; CARMEAN, 1975). Esta propiedad se manifiesta por un crecimiento diferencial de acuerdo con la aptitud del terreno para hacer crecer más o menos deprisa a las especies, que incluye un crecimiento acumulado asintótico máximo que puede variar entre estaciones. Así, en masas sobre terrenos fértiles sin restricciones en el volumen del suelo a explorar por las raíces el crecimiento es fuertemente lineal y el punto de inflexión a partir del cual se alcanza el máximo crecimiento medio se alcanza antes que en masas con restricciones en el crecimiento. La Figura 2 muestra análisis de tronco de *Pinus pinaster* Ait. en cuatro localidades en las que se aprecia esta variabilidad en el patrón de crecimiento.

Esta variabilidad ambiental y en el crecimiento en altura dominante del pino negral observada dentro de la distribución natural de la especie, llevó en una primera fase al desarrollo de curvas de calidad diferentes entre regiones, obligando a la definición y uso de índices de sitio por regiones (BRAVO-OVIEDO et al., 2007). Sin embargo, este modelo regional no explicaba

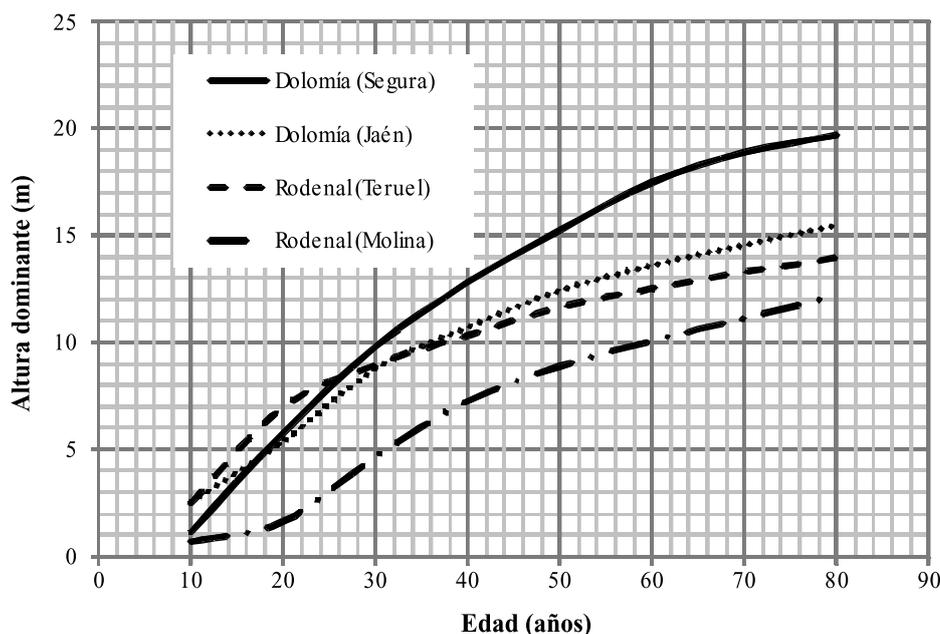


Figura 2. Análisis de troncos de *Pinus pinaster* situados en estaciones diferentes que muestran el polimorfismo presente en el crecimiento en altura dominante de esta especie en función de la estación (Fuente: BRAVO-OVIEDO, 2010)

toda la variabilidad encontrada en el crecimiento en altura dominante, siendo necesaria una mayor flexibilidad en el modelo de crecimiento. Con este fin, se desarrolló un modelo que incorpora variables climáticas y litológicas en la estructura típica de un modelo de crecimiento en altura en diferencias algebraicas, con el que se consiguió explicar parte de esta variabilidad intrarregional y mejorar los resultados del modelo regional (BRAVO-OVIEDO *et al.*, 2008).

Con respecto a la variabilidad temporal, son varios los trabajos en los que se han observado cambios de tendencias en el crecimiento en altura dominante, asociados bien a un aumento del contenido de nitrógeno en el suelo por contaminación o bien a cambios en las condiciones climáticas (KÄHLE *et al.*, 2003; GAMACHE & PAYETTE, 2004; LOPATIN, 2007). Tendencias positivas o negativas en el crecimiento en altura dominante indican cambios en la calidad de estación, aspecto que se trata en el siguiente apartado.

El crecimiento en altura dominante está condicionado entre otros factores por las fluctuaciones climáticas. La mayor parte de los trabajos relativos a la variación temporal del crecimiento en altura provienen de datos de análisis de troncos que ofrecen crecimientos plurianuales. Sin embargo, para poder establecer relaciones causa-efecto entre variables climáticas y crecimiento en altura dominante, y por ende la calidad de estación, es necesario reducir la escala temporal. Debido a la dificultad de obtener datos anuales de esta variable, son poco frecuentes los trabajos que utilizan series temporales largas para relacionar variables climáticas y crecimiento en altura (PENSA *et al.*, 2005). No obstante, el estudio de series cortas puede facilitar la comprensión de esta relación y su posible influencia en los patrones de crecimiento en altura. Como ejemplo, MUTKE *et al.* (2003) encontraron que el crecimiento en altura de *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte está fuertemente correlacionado con la precipitación de junio del año anterior, momento de formación de la yema, mientras que la precipitación de junio del año en curso condiciona la presencia o ausencia de un doble crecimiento anual. En consecuencia, cambios de tendencia en la precipitación de este mes podrían ocasionar cambios significativos en el patrón de crecimiento de esta especie.

VARIABILIDAD DE LA CALIDAD DE ESTACIÓN

El concepto de “estación” se puede entender como la suma de todos los factores que afectan a la distribución y crecimiento de las masas forestales (BARNES *et al.*, 1997), mientras que su relación con la capacidad productiva es la calidad de estación. Entre los factores que intervienen en el desarrollo de los vegetales encontramos agentes bióticos y abióticos como el clima, la fisiografía o el suelo, y que se traducen en factores directos sobre las plantas: luz, calor, agua, nutrientes o perturbaciones. Es evidente que el cambio global puede conllevar cambios en determinadas estaciones forestales modificando su productividad, por lo que el concepto de calidad de estación con un carácter estático deja de tener sentido.

Existen varios trabajos en los que se han constatado cambios en la calidad de estación a través del estudio del crecimiento en altura dominante (RÖHLE, 1997; LEBOURGEOIS *et al.*, 2000; KÄHLE *et al.*, 2003; BONTEMPS *et al.*, 2009). Además del cambio climático, otras posibles causas a las que se han atribuido estos cambios en la productividad son el aumento en las deposiciones de nitrógeno y de la concentración del nitrógeno atmosférico por contaminación. Por otra parte, los cambios en el uso del suelo o en la gestión forestal también pueden producir modificaciones en las estaciones forestales (FOX, 2000; PAUL *et al.*, 2002; BERTHRONG *et al.*, 2009).

La modelización del índice de sitio en función de variables edafoclimáticas permite evaluar el impacto del cambio climático en la calidad de estación. ALBERT & SCHMIDT (2009) analizaron de este modo el posible aumento del índice de sitio de *Picea abies* (L.) Karst. con el escenario A1B del IPCC (2007). La inclusión de variables climáticas en los modelos de crecimiento en altura dominante también posibilita estimar el impacto del cambio climático en el índice de sitio. BRAVO-OVIEDO *et al.* (2010) utilizaron el modelo de crecimiento en altura dominante para *Pinus pinaster* antes mencionado para estudiar los posibles cambios en el índice de sitio de esta especie en distintas regiones con el escenario SRES-A2 (IPCC, 2000), obteniendo diferentes impactos entre regiones y, dentro de cada región, entre calidades de estación (Figura 3).

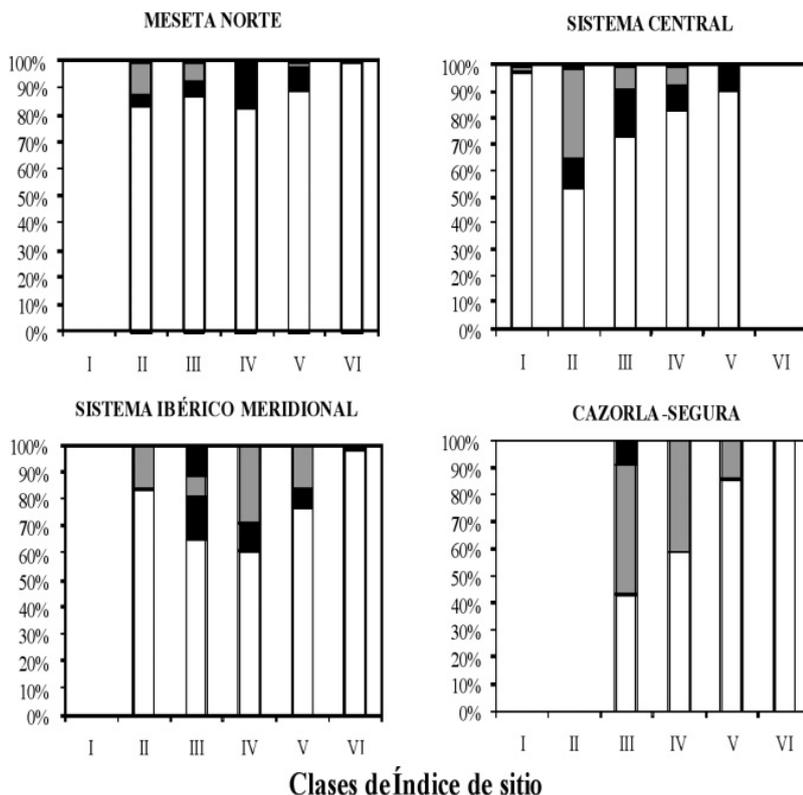


Figura 3. Frecuencia de parcelas que cambian de clase de calidad de estación o que se mantienen en la misma por regiones con el escenario SRES-A2 del IPCC (2000) según el modelo de BRAVO-OVIEDO et al. (2008)

CONSIDERACIONES EN EL USO DEL ÍNDICE DE SITIO

La variabilidad presente en la relación producción-índice de sitio, en el patrón de crecimiento en altura dominante y en la calidad de estación conlleva que las tres hipótesis que se asumen cuando se usa el índice de sitio como estimador de la calidad de estación no son estrictamente ciertas. Sin embargo, esta variabilidad puede ser pequeña dependiendo de la escala espacial y temporal en la que se esté usando el índice de sitio.

Para especies mediterráneas existen pocos estudios sobre la relación entre producción y altura dominante que permitan verificar el cumplimiento de la ley de Eichhorn (MONTERO et al., 1999; CAÑELLAS et al., 2004), y menos aún sobre los niveles de producción, por lo que resulta difícil establecer en qué medida un valor dado de la altura dominante puede representar distintos niveles de producción. Esta variación en la producción puede no ser importante para la gestión desde el punto de vista de la producción de madera, ya que en muchos de los bosques

mediterráneos esta función no es prioritaria, pero es interesante conocer la productividad de los sistemas forestales, su capacidad para fijar carbono en la biomasa y cómo éstas se ven influenciadas por la silvicultura.

Las variaciones en los patrones de crecimiento en altura dominante detectadas por los modelos regionales o intrarregionales y por los análisis temporales conllevan que un mismo valor del índice de sitio exprese distintos patrones de crecimiento en volumen y, por lo tanto, distintas producciones a lo largo del desarrollo del rodal. Como ejemplo, a partir de los datos de las parcelas permanentes de producción de *Pinus pinaster* del CIFOR-INIA, se han ajustado una serie de funciones empíricas que relacionan el número de pies con el desarrollo de la altura dominante, el diámetro medio cuadrático con el número de pies y la altura dominante, y el volumen total con el área basimétrica y la altura dominante (relaciones fundamentales de una tabla de producción). La Figura 4 muestra la evolución del crecimiento medio en volumen obtenida con estas funciones para la región Meseta Norte utilizando dos patrones de crecimiento en altura domi-

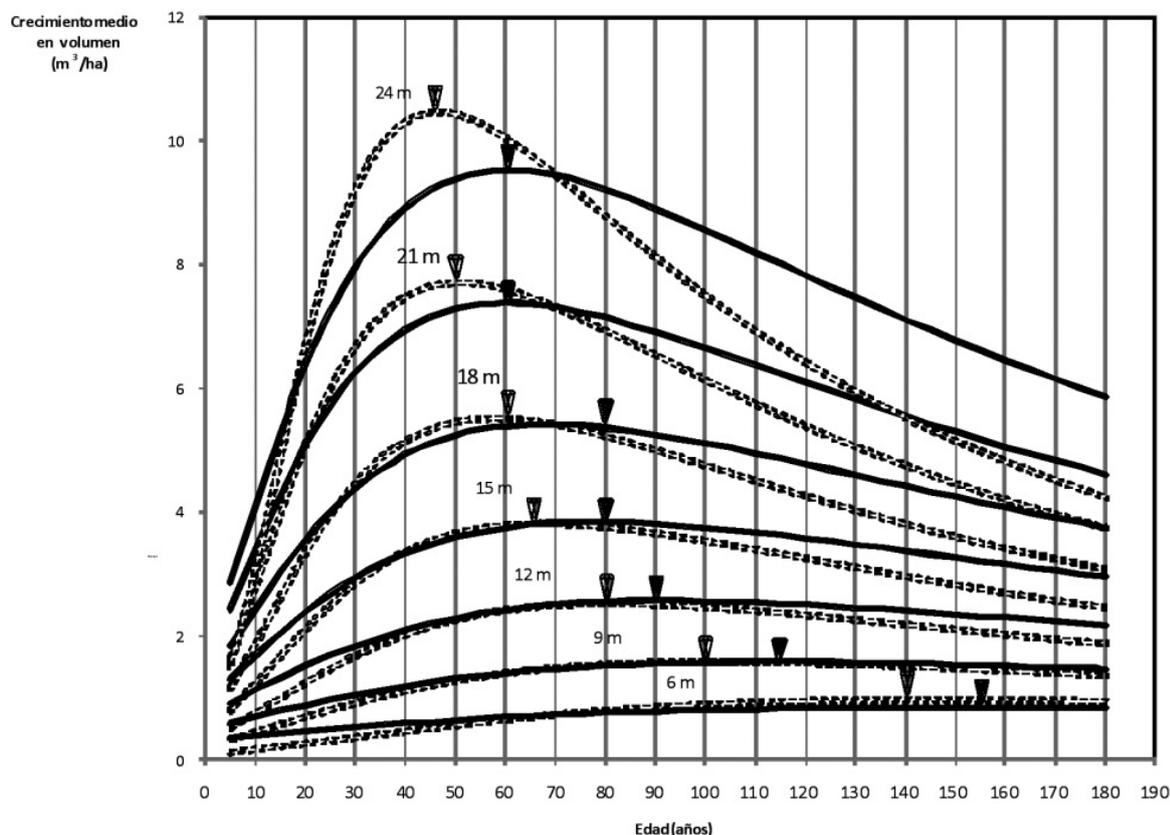


Figura 4. Crecimiento medio en volumen de *Pinus pinaster* obtenido al utilizar el modelo general de crecimiento en altura dominante (línea discontinua) y el modelo regional para la Meseta Norte (línea continua) para distintos índices de sitio (de 6 a 24 m de altura dominante a los 70 años) (BRAVO-OVIEDO *et al.*, 2007). Los triángulos señalan el crecimiento medio máximo (Fuente: BRAVO-OVIEDO, 2010)

nante para esta especie, unas curvas de calidad generales y las curvas de calidad correspondientes a esta región (BRAVO-OVIEDO *et al.*, 2007). Se observa como pequeñas diferencias en la evolución de la curva de crecimiento en altura dominante generan cambios en la producción con implicaciones distintas en la gestión. El momento de máximo crecimiento medio para un índice de sitio de 18 m se alcanzaría a una edad de 60 años con el modelo general, mientras que con el modelo regional se retrasaría hasta los 80.

Con respecto a la variación en la calidad de estación, es importante tener en cuenta en la planificación forestal que a medio o largo plazo es probable que se produzcan cambios en la estación. De este modo, la clasificación de rodales a partir del índice de sitio sigue siendo útil para la gestión forestal a una escala temporal corta, aunque sería necesaria una revisión de esta clasificación con cierta periodicidad. En este sentido cabe cuestionarse qué precisión, asociada a una

mayor complejidad de los modelos, es necesaria en los modelos de crecimiento en altura dominante si su objetivo principal es la clasificación de rodales en calidades de estación.

Otro aspecto a considerar es cómo influye la calidad de estación *vs* índice de sitio en la relación clima-crecimiento secundario, ya que puede condicionar la elección de estrategias selvícolas de adaptación al cambio climático en función de las calidades de estación. La relación clima-crecimiento en diámetro para una misma especie presenta variación según las características de la estación (ORWIG & ABRAMS, 1997; TARDIFF *et al.*, 2003), pero con distintos patrones entre regiones geográficas. En un estudio en el que se analizaron las tendencias de crecimiento en diámetro (cronologías estandarizadas) en árboles dominantes de masas de *Pinus nigra* Arn. en varias regiones de España se observó que existen divergencias en las tendencias asociadas a un aumento de temperaturas durante las últimas décadas (MARTÍN-BENITO

et al., 2010). La mayor parte de los árboles mostraron tendencias negativas, variando el porcentaje de árboles con tendencias positivas según región y calidad de estación.

Además de la estación y situación geográfica, influyen otras características del árbol como su posición sociológica o su edad (ORWIG & ABRAMS, 1997; MARTÍN-BENITO *et al.*, 2008), por lo que es difícil establecer relaciones claras entre calidad de estación y respuesta al clima en crecimiento en diámetro. Este hecho conlleva la necesidad de desarrollar modelos sensibles al clima tanto en crecimiento en diámetro como en altura, pero que a su vez sean sensibles a los tratamientos selvícolas con el fin de que permitan simular medidas de adaptación al cambio climático.

Estas limitaciones en el uso del índice de sitio tienen su repercusión en la modelización forestal. Hoy en día, los modelos de crecimiento y producción empíricos son cuestionados para su uso en un ambiente cambiante por su falta de conexión con los factores subyacentes que determinan la productividad (MONSERUD, 2003). Modelos empíricos desarrollados a partir de datos de crecimientos pasados pueden no ser válidos en un futuro, es decir, son modelos climáticamente estáticos, lo que limita su uso en un escenario de cambio global. En contraposición, los modelos de procesos se basan en procesos ecofisiológicos controlados por factores climáticos y edáficos, por lo cual al estimar el balance del carbono en el ecosistema forestal permiten simular el efecto de distintos escenarios climáticos (MÄKELÄ *et al.*, 2000). No obstante, existen algunas alternativas para paliar en cierto grado esta limitación de los modelos empíricos.

La mayor parte de los modelos de crecimiento empíricos utilizan bien el índice de sitio o bien ecuaciones de crecimiento en altura para considerar las diferencias en productividad entre estaciones. Si tenemos en cuenta las variaciones en el patrón de crecimiento en altura dominante comentadas y su repercusión en la producción del rodal (Figura 4), los modelos que utilizan el crecimiento en altura dominante serán más adecuados que los que utilizan el índice de sitio, ya que permiten incorporar modificaciones en los modelos de crecimiento en altura o en las estimaciones de ésta sin necesidad de modificar otras funciones (VALENTINE, 1997). Por el con-

trario, los modelos que utilizan el índice de sitio asumen que un valor particular de este índice define una evolución de la altura dominante fija.

Dada la precisión y versatilidad para simular escenarios selvícolas de los modelos empíricos, FONTES *et al.* (2011) indican que una posible alternativa para mantener su utilidad es incorporar relaciones entre variables ambientales e índice de sitio en los modelos. Sin embargo, estos autores no consideran la posibilidad de inclusión de variables ambientales en los modelos de crecimiento en altura, que como se ha mencionado, es otra posibilidad para incluir el efecto de las condiciones ambientales en la productividad (BRAVO-OVIEDO *et al.*, 2010). Ambos tipos de modelos suelen utilizar valores promedios de las variables climáticas con el fin de explicar la variación espacial en la productividad, pero no consideran la variación temporal de las condiciones ambientales.

CONCLUSIONES

El índice de sitio es el indicador de la calidad de estación más frecuentemente utilizado por su fácil estimación. Por ello, como indican SKOVSGAARD & VANCLAY (2008), a menudo se interpreta como la “verdadera” producción potencial en volumen, más que como un simple “indicador” de la estación, asumiéndose como uno de los principios básicos de la gestión forestal. La variabilidad en la relación producción-índice de sitio, en el patrón de crecimiento en altura dominante y en la calidad de estación hacen cuestionar este “principio básico” y su aplicación en la gestión forestal, siendo necesario valorar su “utilidad” más que su “validez”, ya que en muchas ocasiones el error es poco importante desde un punto de vista práctico. El inminente cambio global al que nos enfrentamos obliga a que consideremos esta variabilidad en los modelos de crecimiento y producción mediante el desarrollo de modelos ambientalmente dinámicos.

Agradecimientos

Este trabajo recoge parte de los resultados obtenidos en los proyectos de investigación OT03-002, AT10-007, SUM2008-00002-00-00.

BIBLIOGRAFIA

- ASSMANN, E.; 1970. *The principles of forest yield study*. Pergamon Press. Oxford.
- BAILEY, R.L. & CLUTTER, J.L.; 1974. Base-Age invariant polymorphic site curves. *For. Sci.* 20: 155-159.
- BARNES, B.V.; ZAK, D.R.; DENTON, S.R. & SPURR, S.H.; 1997. *Forest Ecology*. John Wiley and Sons. New York.
- BATHO, A. & GARCÍA, O.; 2006. De Perthuis and the origins of site index: a historical note. *FBMIS 1*.
- BERTHRONG, S.T.; JOBBAGY, S.G. & JACKSON, R.B.; 2009. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. *Ecol. Appl.* 19(8): 2228-2241.
- BONTEMPS, J.D.; HERVÉ, J.C. & DHÔTE, J.F.; 2009. Long-term changes in forest productivity: a consistent assessment in even-aged stands. *For. Sci.* 55: 549-564.
- BRAVO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; RÍO, M.; BARRIO, M.; BONET, J.A.; BRAVO-OVIEDO, A.; CALAMA, R.; CASTEDO-DORADO, F.; CRECENTE-CAMPO, F.; CONDÉS, S.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S.C.; LIZARRALDE, I.; NANOS, N.; MADRIGAL, A.; MARTÍNEZ-MILLÁN, F.J.; MONTERO, G.; ORDÓÑEZ, C.; PALAHÍ, M.; PIQUÉ, M.; RODRÍGUEZ, F.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; ROJO, A.; RUIZ-PEINADO, R.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.; TRASOBARES, A. & VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; 2011. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectives. *For. Syst.* 20(2): 315-328.
- BRAVO-OVIEDO, A.; 2010. *Variabilidad del crecimiento en altura dominante de Pinus pinaster Ait. en el interior peninsular*. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid. Palencia.
- BRAVO-OVIEDO, A.; RÍO, M. & MONTERO, G.; 2007. Geographic variation and parameter assessment in generalized algebraic difference site index modelling. *Forest Ecol. Manage.* 247: 107-119.
- BRAVO-OVIEDO, A.; TOME, M.; BRAVO, F.; MONTERO, G. & RÍO, M.; 2008. Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach. *Can. J. For. Res.* 38: 2348-2358.
- BRAVO-OVIEDO, A.; GALLARDO-ANDRES, A.; RÍO, M. & MONTERO, G.; 2010. Regional changes of Pinus pinaster site index in Spain using a climate-based dominant height model. *Can. J. For. Res.* 40: 2036-2048.
- 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.
- CAÑELLAS, I.; RÍO, M.; ROIG, S. & MONTERO, G.; 2004. Growth response to thinning in Quercus pyrenaica Willd. coppice stands in Spanish Central Mountain. *Ann. For. Sci.* 61(3): 243-250.
- CARMEAN, W.H.; 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Adv. Agron.* 27: 209-269.
- CIESZEWSKI, C.J. & BAILEY, R.L.; 2000. Generalized Algebraic Difference approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.* 46: 116-126.
- CHRISTIE, J.M. & EDWARDS, 1981. Yields Models for Forest Management. *Forestry Commission Booklet.* 48: 32 pp.
- CLUTTER, L.L.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H. & BAILEY, R.L.; 1983. *Timber management: A quantitative approach*. Wiley. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- DANIEL, T.W.; HELMS, J.A. & BAKER, F.S.; 1979. *Principles of silviculture*, 2nd edition. McGraw-Hill Book Co. New York.
- FONTES, L.; BONTEMPS, J.D., BUGMANN, H.; VAN OIJEN, M.; GRACIA, C.; KRAMER, K.; LINDNER, M.; RÖTZER, T. & SKOVGAARD, J.P.; 2011. Models for supporting forest management in a changing environment. *For. Syst.* 19: 8-29.
- FOX, T.R.; 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecol. Manage.* 138: 187-202.
- GARCÍA, O.; 2006. Site index: Concepts and Methods. In: C.J.C.A.M. Strub (ed.), *Second International Conference on Forest Measurements and Quantitative Methods and Management & The 2004 Southern Mensurationists Meeting*: 275-283. Warnell

- School of Forestry and Natural Resources. Hot Springs, Arkansas.
- GOELZ, J.C.G. & BURK, T.T.; 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 22: 776-784.
- HAMILTON, G.J. & CHRISTIE, J.M.; 1971. Forest managements tables (metrics). *Forestry Commission Booklet* 34: 1-201.
- HASENAUER, H.; BURKHART, H.E. & AMATEIS, R.L.; 1997. Basal area development in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *Can. J. For. Res.* 27: 265-271.
- IPCC; 2000. *Special report on emission scenarios*. A special report of IPCC working group III.
- IPCC; 2007. *Fourth assessment report*. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>.
- KAHLE, H.P.; SPIECKER, H.; UNSELD, R.; PÉREZ-MARTÍNEZ, P.J.; PRIETZEL, J.; MELLERT, K.H.; TRAUSSBERGER, R. & REHFUESS, K.E.; 2003. Relationships between tree nutrition, water supply, nitrogen deposition and the growth of three tree species in Europe (empirical). In: T. Karjalainen & A. Schuck (eds.), *Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe - Results of the RECOGNITION Project*.
- KRUMLAND, B. & ENG, H.; 2005. *Site index systems for major young-growth forest and woodland species in northern California*. The Resources Agency. Dpt. Forestry & Fire Protection.
- LAPPI, J. & BAILEY, R.L.; 1988. A height prediction model with random stand and tree parameters: an alternative to traditional site index methods. *For. Sci.* 34: 907-927.
- MÄKELÄ, A.; LANDSBERG, J.; EK, A.R.; BURK, T.E.; TER-MIKAEIAN, M.; ÅGREN, G.I.; OLIVER, C.D. & PUTTONEN, P.; 2000. Process-based models for forest ecosystem management: current state-of-art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology* 20: 289-298.
- MARTÍN-BENITO, D.; CHERUBINI, P.; DEL RÍO, M. & CAÑELLAS, I.; 2008. Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. *Trees* 22(3): 363-373.
- MARTÍN-BENITO, D.; RÍO, M. & CAÑELLAS, I., 2010. Black pine (*Pinus nigra* Arn.) growth divergence along a latitudinal gradient in Western Mediterranean mountains. *Ann. For. Sci.* 67: 401.
- MONSERUD, R.A.; 1984. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *For. Sci.* 30: 943-965.
- MONSERUD, R.A.; 2003. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. *FBMIS* 1: 35-47.
- MONTERO, G.; ORTEGA, C.; CAÑELLAS, I. Y BACHILLER, A.; 1999. Productividad aérea and dinámica de nutrientes en una población de *Pinus pinaster* Ait. sometida a distintos regímenes de claras. *Inv. Agraria; Sist. Rec. For.* Fuera de Serie: 175-206.
- OLIVER, C.D. & LARSON, B.C.; 1996. *Forest Stand Dynamics*. John Wiley and Sons. New York.
- ORWIG, D.A. & ABRAMS, M.D.; 1997. Variation in radial growth responses to drought among species, site and canopy strata. *Trees* 11: 474-484.
- PAUL, K.I.; POLGLASE, P.J.; NYAKUENGAMA, J.G. & KHANNA, P.K.; 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecol. Manage.* 168: 241-257
- RÍO, M.; CALAMA, R.; CAÑELLAS, I.; ROIG, S. & MONTERO, G.; 2008. Thinning intensity and growth response in SW-European Scots pine stands. *Ann. For. Sci.* 65: 308.
- SKOVSGAARD, J. P. & VANCLAY, J.K.; 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81: 12-31.
- TARDIF, J.; CAMARERO, J.J.; RIBAS, M. & GUTIÉRREZ, E.; 2003. Spatiotemporal variability in tree growth in the central Pyrenees climatic and site influences. *Ecol. Monogr.* 73(2): 241-257.
- VALANTINE, H.T.; 1997. Height growth, site index, and carbon metabolism. *Silva Fennica* 31: 251-263.
- VANCLAY, J.K.; 1994. *Modelling forest growth and yield*. CAB International. Wallingford.
- WOOLLONS, R.C.; SNOWDON, P. & MITCHELL, N.D.; 1997. Augmenting empirical stand projection equations with edaphic and climatic variables. *Forest Ecol. Manage.* 98: 267-275.
- ZEIDE, B.; 2001. Thinning and growth: a full turn-around. *J. For.* 99: 20-25.