

Modelización forestal a partir de los datos del Inventario Forestal Nacional

N. CAÑADAS; F. BRAVO
y G. MONTERO

INTRODUCCIÓN

Un modelo es una abstracción o representación simplificada de la realidad. Esta abstracción puede expresarse de forma gráfica, verbal o matemática. En este último caso representado por un conjunto de ecuaciones, tablas o programas informáticos. Cuando se hace referencia a un modelo forestal de crecimiento y producción, se está hablando, habitualmente, de un modelo matemático, que generalmente integra una serie de ecuaciones, y cuyo objetivo fundamental es la proyección en el tiempo de la evolución de una masa o, al menos, de algún aspecto de su dinámica, pudiendo incorporar las intervenciones intermedias que se efectúen sobre ella. Dichos modelos constituyen herramientas muy útiles para la gestión forestal, al proporcionar un medio que permite predecir producciones futuras y, muchas veces, explorar opciones selvícolas alternativas.

Como la evolución de una masa (y específicamente, de cada uno de sus integrantes: los árboles) está ligada a su crecimiento, las ecuaciones que expresan específicamente algún aspecto de crecimiento de la misma, o de cada árbol, son las que se consideran “ecuaciones clave” o “ecuaciones de paso” (son las que llevan el sistema desde

un momento cualquiera t_1 a otro momento t_2) en los modelos. Las demás expresiones que hayan de establecerse se pueden denominar "de estado", puesto que estimarán más variables referidas a cada árbol o a la masa en su conjunto, a partir de los valores que tomen las primeras, pero ya en un mismo punto del tiempo, o momento dado.

Existe una gran diversidad de modelos, y junto a ellos, una gran variedad de clasificaciones. Una de las más frecuentes es la que distingue los modelos según la unidad básica de modelización; así se distingue entre modelos de rodal completo, de clase de tamaños (habitualmente clases diamétricas) y modelos de árbol individual (MUNRO, 1974; VANCLAY, 1994). La complejidad de la elaboración y la versatilidad en el uso corre pareja, de modo que los modelos más complejos de desarrollar, que son los de árbol individual, son a su vez los que permiten que el usuario obtenga una información más completa. Por otra parte, los modelos de producción forestal deben ser simples, biológicamente consistentes, acordes con la teoría del crecimiento forestal y predecir respuestas razonables a la simulación de tratamientos selvícolas (VANCLAY *et al.*, 1996).

Modelos de rodal completo

En este tipo de modelos, se considera la masa o rodal como unidad primaria de modelización, estimándose su evolución a partir de características medias o dominantes de la misma (edad media, diámetro medio cuadrático, altura dominante, etc): son las que se denominan variables de masa. Dentro de estos modelos se incluyen las tradicionales **tablas de producción**: un tipo de modelos simples y sencillos que fueron desa-

rollados ampliamente cuando los medios informáticos con que se contaba eran inexistentes o escasos, no permitiendo abordar el establecimiento de relaciones más complejas. Su sencillez, y su fácil comprensión y manejo junto con la escasez de datos más completos ha facilitado que en muchos casos sean los únicos modelos disponibles para los gestores forestales. Las características comunes a todos los tipos de tablas de producción son que están referidas a masas puras, homogéneas y coetáneas, y que proporcionan estimaciones medias de ciertas variables de masa con la edad, pero según un número de clases de calidad de la estación discretas y preestablecidas. Las más antiguas se elaboraban exclusivamente para la estimación de la producción de volúmenes de madera en masas o rodales 'normales' o de espesura completa. Posteriormente, las tablas de selvicultura variable o de referencia, introdujeron ciertos factores correctores en las anteriores según diversos grados de densidad de las masas, que se obtenían a partir de experiencias de claras, y de mediciones realizadas en parcelas de distintas densidades. Existe una amplia bibliografía que aborda el tema de los métodos utilizados en la realización de tablas de producción (ver por ejemplo: SPURR, 1952; DECOURT, 1972; HAMILTON Y CHRISTIE, 1971; BARTET Y BOLLIET, 1976; PARDÉ Y BOUCHON, 1988), y también existe amplia bibliografía sobre las tablas de producción elaboradas para masas españolas (ROJO Y MONTERO, 1994; MADRIGAL *et al.*, 1999).

En las tablas de producción, la ecuación clave que determina el crecimiento del rodal en su conjunto viene definida habitualmente a partir de la evolución en el tiempo de la altura dominante H_0 del rodal (modelos de calidad de estación): para predecir la altura dominante en un momento t_2 futuro, partimos de los datos

de edad y altura dominante en el momento t_1 actual. Una vez conocido el valor de H_0 para t_2 , se establecen las relaciones "de estado", capaces de describir el resto de variables de masa para el rodal en el momento t_2 -a partir de variables ya estimadas (H_0) o fijadas por nosotros (por ejemplo, el número de pies por hectárea, N): son las llamadas "relaciones fundamentales" en la construcción de las tablas de producción.

En la actualidad, los modelos de rodal completo que se están desarrollando distan bastante de las primigenias tablas de producción. Los modelos más recientes incorporan ya explícitamente expresiones de las distribuciones diamétricas del rodal, que constituyen formas de proyección de éste a lo largo del tiempo: **modelos de distribuciones diamétricas** (revisan el tema con profundidad CONDÉS, 1997, RÍO, 1998 o GARCÍA GÜEMES, 1999). Esto permite obtener simultáneamente una estimación de la producción global del rodal y de su forma de distribución, y flexibiliza el dominio de aplicación de los modelos, ampliándolo a masas de ciertas estructuras -cualesquiera que sean capaces de representar los modelos matemáticos de distribución¹, y de cualquier densidad.

Modelos de tipo árbol individual

En los modelos de árbol individual, se toma directamente como unidad de modelización cada árbol integrante del rodal, considerando su crecimiento individual y sus características particulares, y obteniendo después, mediante procesos agregativos, la descripción o estimación

de la evolución y estados del rodal completo. Los modelos de tipo árbol nacen al amparo de las modernas técnicas informáticas, y ante la necesidad de paliar ciertas insuficiencias de los modelos de tipo masa (resultados demasiado globales, rigidez en cuanto a su manejo,...) que dificultan su aplicación en masas de estructura compleja, mixtas o disetáneas. En conjunto, este tipo de modelos aporta información bastante detallada de cualquier sistema; pero a cambio, su construcción y empleo efectivos presenta el inconveniente de requerir unos datos de partida más completos que en el caso de los modelos de tipo masa. Cuando el conjunto de datos requerido no está disponible en los inventarios, su obtención *a posteriori* supone normalmente un elevado coste adicional. Sin embargo, en general se pretende que los datos que deba obtener el usuario para manejar este tipo de modelos no sea muy diferente de los que de forma habitual se obtienen para proyectos de ordenación o para planificación de intervenciones selvícolas.

En los modelos de tipo árbol, la ecuación clave siempre presente suele ser un modelo de crecimiento en diámetro o en sección normal del árbol individual. A veces, está también presente un modelo de crecimiento en altura aunque, casi siempre, ésta se puede obtener para el momento t_2 , a partir de una simple relación altura-diámetro. Si embargo la gran variabilidad de esta relación hace que para obtener buenas predicciones sea preciso disponer de modelo de crecimiento en altura. En ocasiones, en ese tipo de relaciones altura-diámetro aparece también la altura dominante de la masa como variable independiente (MONNESS, 1982; ZHANG *et al.*, 1997; CAÑADAS *et al.*, 1999), pasando entonces el modelo de evolución de altura dominante (o de calidad de estación) a convertirse en "ecuación de paso". Otro aspecto importante es

¹ aunque normalmente, en la práctica, suelen limitarse a masas regulares y semirregulares.

poder predecir la tasa de mortalidad o supervivencia ya que la hipótesis de que la mortalidad natural no existe o es insignificante es en muchos casos arriesgada. En raras ocasiones, la ecuación clave es directamente una expresión del crecimiento en volumen.

El crecimiento que experimenta un árbol a partir de un momento dado depende tanto de factores internos -genotipo, fenotipo, edad- como de factores externos: estación en que se encuentre, y competencia a que se vea sometido. Todo ello ha de venir reflejado en la expresión matemática del crecimiento. En el caso de la competencia, ésta aparece expresada mediante índices (de competencia inter-árboles), concebidos como maneras de manifestar las limitaciones que imponen el resto de individuos al desarrollo de cada árbol en su pugna por los recursos del medio y por la ocupación del espacio. Según su expresión, los modelos de tipo árbol se dividen a su vez en modelos de tipo árbol dependientes de la distancia, y modelos de tipo árbol independientes de la distancia.

En los modelos de tipo árbol dependientes de la distancia, cada árbol de un rodal se localiza por un sistema de coordenadas espaciales. A partir de ahí, su crecimiento se considera condicionado a sus propias características, a las características de sus vecinos, y al 'espacio vital' del primero o a la relación espacial y de tamaño existente entre todos ellos. La gran cantidad de índices de competencia que surgen y evolucionan asociados al desarrollo de estos modelos, se han agrupado de forma general, según los distintos criterios adoptados en la definición de la competencia, del siguiente modo (OTTORINI, 1978; DANIELS *et al.*, 1986; TOMÉ Y BURKHART, 1989, BRAVO *et al.*, 2001):

a) Índices de razón del tamaño ponderado por la distancia: consisten en los

sumatorios de las razones de alguna dimensión de un árbol entre la de cada uno de sus competidores, y ponderados por una función de la distancia que separa al árbol de su competidor.

b) Índices de solapamiento de áreas, basados en la definición del área de influencia del árbol sujeto y de sus competidores: todo árbol cuyo área de influencia solapa con la del árbol dado, se considera su competidor. Diferentes definiciones de áreas de influencia, medidas de solape y el uso de distintas ponderaciones en la suma de los solapes, definen distintos índices.

c) Índices de área potencialmente disponible: consiste en la delimitación alrededor de un árbol de su área disponible, área que habitualmente toma forma de polígono en función de la situación y dimensiones de los árboles vecinos. El área de este polígono, es el área potencialmente disponible para el árbol, y reflejo de su posición social respecto del resto.

El elevado costo que supone la cartografía de los árboles de un rodal para la calibración y aplicación de estos modelos junto con la incertidumbre, aún no resuelta, de si la competencia a que está sometido un árbol se puede realmente describir de manera rigurosa mediante la sola consideración de la influencia de alguna dimensión de los pies vecinos, y sin tener en cuenta ninguna otra del resto de la masa -que puede venir dada, por ejemplo, a través de las raíces- (STIELL, 1970), ha conducido al planteamiento y desarrollo de los modelos de tipo árbol independientes de la distancia. En este tipo de modelos, la masa viene definida y caracterizada por una lista de árboles con sus dimensiones, sin hacer referencia a su localización espacial. La competencia en este

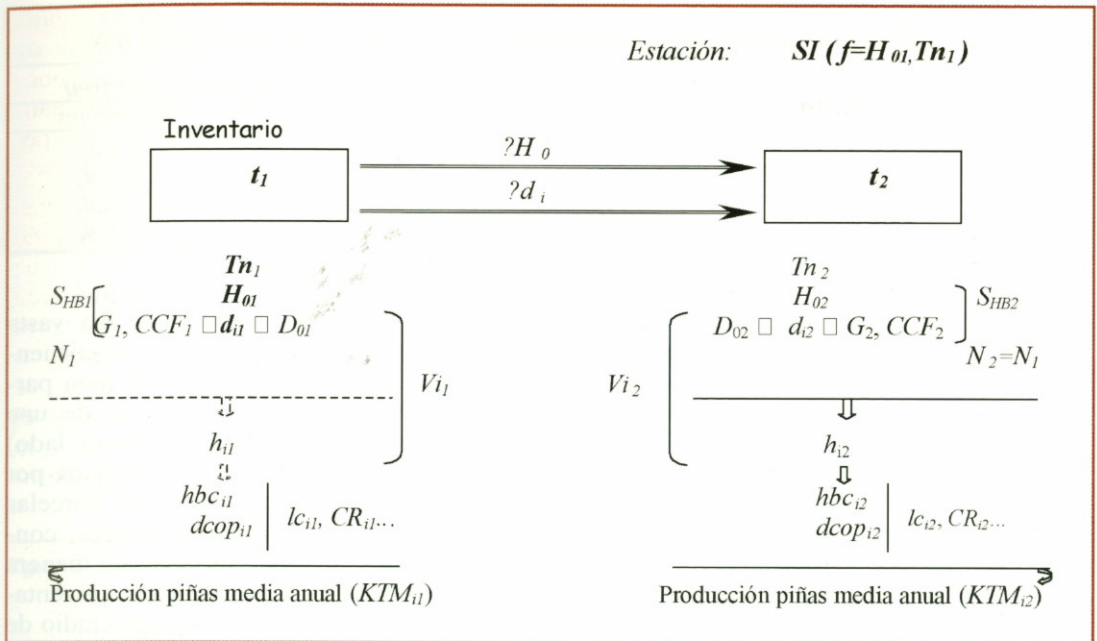


Figura 1. Modelo de crecimiento y producción tipo árbol individual para una masa regular. t_1 y t_2 marcan los dos momentos entre los que transcurre el desarrollo del modelo; los subíndices 1 y 2 en las variables se refieren a cada uno de ellos. Las líneas y flechas discontinuas indican la posibilidad que ciertas variables puedan obtenerse a partir de otras, o bien puedan ser medidas directamente (en t_1 o fase de inventario). Las líneas y flechas de trazo continuo marcan la vía imprescindible que es necesario seguir para obtener las variables que apuntan. En negrita, las variables mínimas que es preciso medir durante el inventario. Tn = edad de los árboles dominantes; H_0 = altura dominante; d_i = diámetro del árbol i ; D_0 = diámetro dominante; CCF = factor de competencia de copas; G = área basimétrica; SHB = espaciamiento de Hart-Becking; N = pies por hectárea; H_i = altura del árbol i ; hbc_i = altura de la base de la copa del árbol i ; $dcop_i$ = diámetro de copa del árbol i ; lc_i = longitud de copa del árbol i ; CR_i = crown ratio; KTM_i = kilos de piña media por año; V_i = volumen maderable en pie del árbol i

caso viene dada por el conjunto de la masa (no sólo de los vecinos), expresándose a través de las dos siguientes:

- medidas de la densidad: área basimétrica (G); índice de densidad de Reineke (SDI); factor de competencia de copas (*Crown Competition Factor*: CCF); factor de espaciamiento de Hart-Becking (S_{HB}); etc, y
- expresiones que reflejan el *status* o posición social de un árbol en el rodal: entre los más sencillos de este grupo se encuentran relaciones entre el diámetro de un árbol (d) y el diá-

metro medio o dominante de la masa (D_0): (d/D_0) ; entre el diámetro del árbol y la altura dominante del rodal (H_0): (d/H_0) ; área basimétrica que suman los pies cuyo diámetro es superior a del árbol dado... (G_{sup_i}), competencia de copas a la altura del árbol considerado o CCH : *Crown Competition at Height* (STAGE, 1973; WYKOFF *et al.*, 1982; ARNEY, 1985; WYKOFF, 1990; QUICKE *et al.*, 1994; HUANG Y TITUS, 1995; LEJEUNE, 1996; STERBA Y MONSERUD, 1997, BRAVO *et al.*, 2001).

Tabla 1. Diámetros mínimos inventariables según las parcelas concéntricas del IFN

Distancia del árbol <i>i</i> al centro de la parcela (<i>m</i>)	Radio de la parcela correspondiente (<i>m</i>)	Diámetro mínimo inventariable (cm)	
		Pies menores	Pies mayores
$l_i \leq 5$	5	$2,5 < d_i < 7,5$	$7,5 \leq d_i$
$5 < l_i \leq 10$	10	-	$12,5 \leq d_i$
$10 < l_i \leq 15$	15	-	$22,5 \leq d_i$
$15 < l_i \leq 25$	25	-	$42,5 \leq d_i$

Estos modelos suponen un compromiso entre los modelos de masa y los de tipo árbol dependiente de distancias. Se basan en cada árbol individual, pero globalizan la masa para expresar su influencia sobre cada pie.

Como ejemplo de modelo independiente de distancias, se muestra un esquema del desarrollado por CAÑADAS (2000) para *Pinus pinea* en el Sistema Central (Figura 1). En este modelo, las ecuaciones de crecimiento o "de paso" desde el momento t_1 hasta el momento t_2 son dos ecuaciones capaces de predecir, de un lado, el crecimiento en diámetro de cada árbol individual, y, de otro, la evolución de la altura dominante. El resto de variables vienen inferidas a través de ecuaciones "de estado", que sirven para obtener datos interesantes para el gestor, y pueden funcionar como variables independientes dentro de las ecuaciones "de paso".

CONSIDERACIONES SOBRE EL EMPLEO DE LOS DATOS DEL INVENTARIO FORESTAL NACIONAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE CRECIMIENTO

Estructura de los datos del inventario (ICONA, 1990)

El Inventario Forestal Nacional constituye un magnífico soporte como base de

datos, pues nos proporciona una vasta cantidad de información que se encuentra uniformemente distribuida (con parcelas de muestreo en vértices de una malla cuadrada de un kilómetro de lado) y por tanto, muy bien representada por todo el territorio nacional. Las parcelas están concebidas como circulares, concéntricas y de radio variable, de manera que el diámetro normal mínimo inventariable va variando con el propio radio de la parcela (Tabla 1).

En el Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2), de cada árbol inventariado se conoce la especie, posición, dos diámetros normales en cruz; altura, calidad (en gradación desde totalmente sano y vigoroso, hasta muerto), y cubicación según la forma que presente el árbol; cuando las parcelas son coetáneas (masas repobladas), viene además especificada la edad. Si se trata de árboles tipo (de los que se toman de cuatro a seis por parcela, de entre los incluidos en el círculo de 5 m de radio), existen también datos de dos diámetros de copas perpendiculares, así como de dos espesores de corteza, y dos crecimientos radiales de los últimos cinco años (todos ellos tomados según las mismas direcciones en que fueron medidos los diámetros); si los árboles son fusiformes y con altura de fuste superior a 4 m, aparece también el diámetro a esa altura; y si son bien fusiformes de troncos menores de 4 m, o bien ramificados por debajo de esa altura, se dan los diámetros fin de fuste y altura de fuste; sólo en uno de

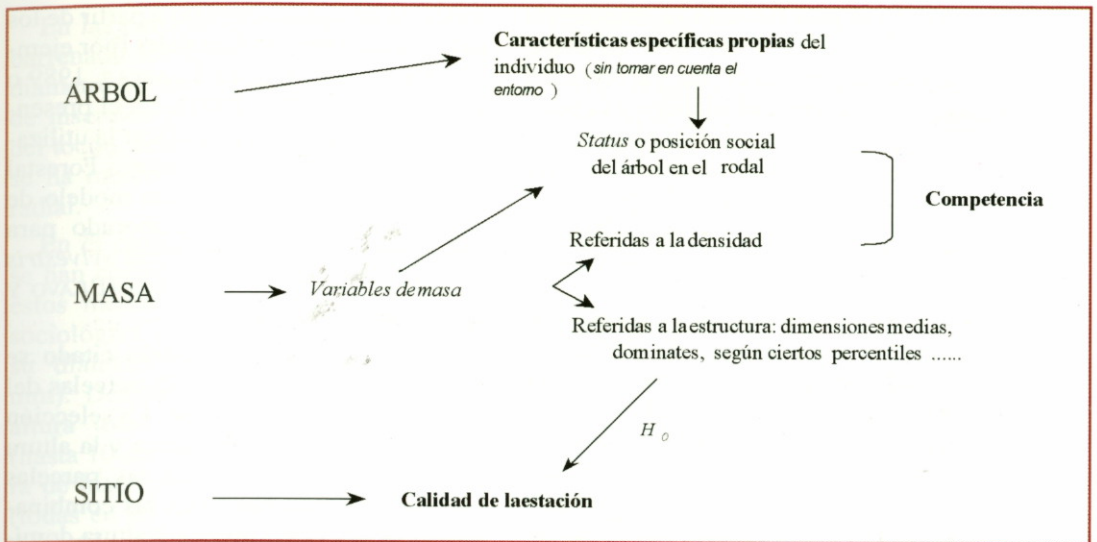


Figura 2. Esquema de los factores que determinan el crecimiento individual de un árbol integrante de un rodal

los casos anteriores (árboles fusiformes con tronco menor de 4 m), el inventario aporta también la altura del primer verticilo vivo. En cuanto a los pies menores, se dispone del número, especie, y altura media que alcanzan, tomados dentro del círculo de 5 m de radio; no aparece su localización espacial.

Limitaciones de los datos del Inventario Forestal Nacional para la elaboración de modelos forestales

Los datos disponibles condicionan de forma determinante tanto el tipo de modelo que se puede ajustar como la precisión de las predicciones que se hagan con el modelo resultante. Los datos del IFN2 tienen las siguientes características que condicionan la elección del tipo de modelo:

1. Sólo se dispone de una medición.
2. Al realizarse mediante parcelas circun-

lares y de radios múltiple es necesario estimar mediante los factores de expansión el número de árboles y su distribución diamétrica por unidad de superficie.

Ekö (1985) enumera las ventajas y desventajas de las parcelas de inventarios para la elaboración de modelos. Las **ventajas** son: (1) los datos son un muestreo objetivo de las masas forestales objeto de estudio, y (2) son un gran número de datos homogéneos bien distribuidos geográficamente y que cubren un gran número de rodales y calidades de la estación. Las **desventajas** son las siguientes: (1) los datos son medidos usualmente con menor precisión que en las parcelas experimentales, permanentes o temporales, (2) el número de árboles por parcela es pequeño, (3) los tratamientos selvícolas previos son sólo someramente conocidos y (4) las estaciones extremas están sólo representadas normalmente.

En la actualidad de forma generaliza-

da en todo el país tan sólo se dispone de los datos del IFN2. Dado que, tal como se ha descrito antes, en las parcelas del IFN2 sólo se conoce el número y la posición exacta de todos los pies mayores en el área que comprende el círculo interior de radio 5 m. Una parcela de este tamaño, independientemente de los datos disponibles de dichos árboles, no representa adecuadamente un rodal forestal de modo que el desarrollo de un modelo de crecimiento dependiente de distancias sólo podría ser aplicable para pies muy centrados en la parcela, de los que se tuviese certeza que todos los árboles mayores que le rodean han sido inventariados. En general, esto es difícil de asegurar, y parece poco lógico hacer suposiciones iniciales en modelos tan exhaustivos y detallistas como son los dependientes de la distancia.

En el caso de los modelos de árbol individual independientes de la distancia, no existe el problema de que sea necesario conocer la posición real exacta de cada uno de los árboles integrantes en la parcela. Para llegar a establecer una ecuación empírica sobre el crecimiento individual de los árboles según un modelo independiente de distancias (ecuación clave, o "de paso" del modelo), necesitamos disponer, además del dato de crecimiento de los árboles, de variables independientes que reflejen las características iniciales de los mismos, antes del período de crecimiento; de su *status* social; de la masa donde se encuentren y del medio (Figura 2).

APLICACION DE LOS DATOS DEL IFN PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS DE RODAL COMPLETO

En diversos países se han desarrollado (elaborado, evaluado y/o calibrado)

modelos de rodal completo a partir de los datos de inventarios forestales (por ejemplo, EKÖ, 1985, IBÁÑEZ ULARGUI, 1989 o BRAVO Y MONTERO, 2002). En el presente Capítulo se va a ejemplificar la utilización de los datos del Inventario Forestal Nacional para desarrollar un modelo de rodal completo con el elaborado para masas de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) en el Alto Valle del Ebro (BRAVO Y MONTERO, 2001 y 2002).

Para desarrollar el modelo citado se seleccionaron y visitaron 75 parcelas del IFN2 en la zona de estudio. La selección se basó en el área basimétrica y la altura dominante; de este modo las parcelas visitadas representan todas las combinaciones de área basimétrica y altura dominante encontradas. Además se utilizaron datos de árboles tipo proveniente de proyectos de ordenación de la zona, se apearon árboles dominantes y se tomaron muestras edáficas en las parcelas del IFN2.

Dado que en el área de estudio han sido habituales las cortas por huroneo o *floreos* hasta fecha relativamente reciente, en cada una de las parcelas del IFN2 visitadas se ha anotado si existían signos de que se hayan realizado *floreos*. Se han apeado dos árboles dominantes en las proximidades de las parcelas que representan las mayores densidades y alturas dominantes encontradas (23 parcelas) y se han extraído los crecimientos de dos árboles dominantes a 1,3 m de altura y en la base en otras 52 parcelas. Los datos así obtenidos sirvieron para ajustar el modelo de producción y para datar las parcelas del IFN2. No se consideró ningún criterio de ajuste entre la altura y el diámetro para la selección de los árboles pues el trabajo de campo complementario (apeo de árboles dominantes) se realizó entre 6 años (en Burgos) y un año (en Álava) después del apeo de las parcelas del IFN2.

En las parcelas donde tan sólo se han barrenado los árboles se ha medido, su diámetro normal, su altura total, de fuste, de inserción de la primera rama viva y del tocón, además a partir de los testigos se ha medido la edad y el crecimiento radial.

En el caso de las parcelas en las que se han cortado árboles se seleccionaron éstos mediante el criterio de posición sociológica y antes de su apeo se midió su diámetro normal con corteza (en mm). Después de cortado se midió su altura total, la altura total maderable (hasta 10 cm en punta delgada) y la altura de inserción de la primera rama viva (todas en m), se midió también la altura del tocón (en cm). Seguidamente se cortaron discos del árbol coincidiendo con el tocón, la sección normal, secciones de metro en metro hasta los 5,3 m y cada dos metros hasta la punta. En algunas ocasiones no se obtuvo la última sección por ser muy pequeña o haberse roto la copa. Finalmente se corto el tocón para permitir la lectura de la edad en la parte más baja del árbol.

Antes de medir las secciones de los árboles apeados en el laboratorio, se procedió a seleccionar dos radios de cada una de ellas. El proceso operativo es el siguiente (ROJO Y MONTERO, 1996): (1) se miden los diámetros mayor y menor de la sección, (2) se calcula su superficie asimilándola a una elipse y (3) se calcula el radio de la circunferencia de igual superficie que la de la sección elipsoidal. Una vez así calculado el radio se procede a: (1) buscar dos direcciones cuya distancia del centro de los anillos al borde de la sección fuese igual al radio anterior, (2) lijar estas zonas de la sección, (3) capturar mediante un escáner la imagen de los crecimientos anuales de estos radios y (4) contar semiautomáticamente el número de anillos presentes en cada radio mediante el programa WinDendro

v 6.2 (RÉGENT INSTRUMENT INC., 1997a y 1997b)

Para estudiar el comportamiento y calibrar el modelo de producción se utilizaron parcelas permanente y ensayos de claras del banco de datos del Centro de Investigaciones Forestales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (CIFOR-INIA). Dado que en la zona fueron frecuentes las cortas por huroneo además de elaborar unas curvas de calidad fue preciso desarrollar una regla edáfica discriminante que permitiese determinar la calidad de la estación de las parcelas huroneadas (BRAVO Y MONTERO, 2001). En esta regla discriminante la textura y la capacidad de intercambio catiónico permite asignar con una alta fiabilidad (más del 66,66%) la calidad de estación de los rodales estudiados.

La forma de modelo de masa elegido fue el multiplicativo que se basa en la ley de Mitscherslich o de los factores limitantes. Estos modelos presentan además la ventaja de ser fácilmente linealizables lo que facilita la obtención de los parámetros iniciales precisos para su ajuste por métodos iterativos. Los modelos obtenidos mediante ajuste no lineal fueron los siguientes:

$$G = 0.033 * N^{-0.107} * SDI^{1.161}$$

$$V = 0.168 * SDI^{0.913} * Ho^{0.413}$$

La eficiencia de estos modelos se estudion mediante un índice (EF) propuesto por SOARES *et al.* (1995) y por VANCLAY *et al.*, (1996) y que se expresa de la siguiente forma:

$$EF = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Si el índice de eficiencia del modelo es igual a 1 indica un ajuste 'perfecto', por el contrario si es igual a cero el modelo no es mejor que una simple media y si toma valores negativos el modelo es peor que la media de los datos.

Para el modelo de área basimétrica el índice de eficiencia es igual a 0.9546 mientras que en el caso del volumen es igual a 0.4964; estos valores muestran que las variables explicativas seleccionadas y la forma multiplicativa del modelo son adecuadas para el área basimétrica. En el caso del volumen es diferente puesto que el bajo EF no es tanto achacable al modelo como a los tratamientos selvícolas aplicados en estas masas (huroneos) que han perturbado la estructura de las mismas. En la práctica esto se traduce en que el modelo sobreestima los volúmenes cuando la altura dominante y la densidad son bajas y en cambio los infraestima cuando son altas. Dado que las prácticas selvícolas actuales excluyen los huroneos es preciso calibrar el modelo para que realice adecuadas predicciones en estas condiciones selvícolas (el calibrado de modelos en realidad es siempre necesario cuando se pretenden utilizar fuera del área geográfica o bajo regímenes selvícolas diferentes de los datos con los que se elaboraron). El método tradicional de calibrado de las tablas de producción basado en la proporción entre el área basimétrica real y el área basimétrica de la tabla se aplica de forma rutinaria. Este método asume que el modelo queda inalterado en cuanto a su forma y que tan sólo se producen diferencias cuantitativas en los resultados (volumen, área basimétrica, crecimientos, ...). No siempre es cierta esta premisa, especialmente cuando existen fuertes diferencias en los tratamientos selvícolas aplicados en las masas para las que se elaboró el modelo de producción y los que se aplican en las masas en que se pretende apli-

car. Por ello en el caso que nos ocupa se recurrió a estudiar la eficiencia predictiva de los modelos de área basimétrica y de volumen para los datos de las parcelas de claras del CIFOR-INIA (BRAVO Y MONTERO, 2002). La eficiencia del modelo del área basimétrica fue igual a 0,9888 mientras que el modelo de volumen presentaba una eficiencia igual a 0,8062 (este valor es mayor que con los datos originales pero puede deberse al rango de edades, 41 a 75 años, de las parcelas de claras utilizadas). Por tanto, tan sólo se calibró el modelo de volumen. El método de calibrado utilizado (BRAVO Y MONTERO, 2002) asume que el valor real de la variable explicativa viene determinado por la expresión siguiente:

$$y = f(x) + \varepsilon + \delta$$

donde: y es el valor real de la variable, $f(x)$ es el valor estimado por el modelo, ε es el error aleatorio del modelo, y δ es el factor de calibrado que representa el 'error' derivado de utilizar el modelo fuera de su rango de construcción. Además se asume que el factor de calibrado (δ) se distribuye normalmente, tiene media conocida pero distinta de cero y varianza conocida. El valor de calibrado, o error cometido por utilizar el modelo fuera del rango (selvícola o geográfico) de elaboración puede obtenerse como función de alguna variable selvícola, presente o no en el modelo. De esta manera si los errores del modelo siguen una clara tendencia con respecto a una variable, basta aplicar esta función de calibrado para que el modelo se ajuste mejor (Figura 3). El factor de calibrado así obtenido tendrá media y desviación típica desconocida, ya que depende tanto del modelo como de la nueva situación en que se pretenda aplicar éste.

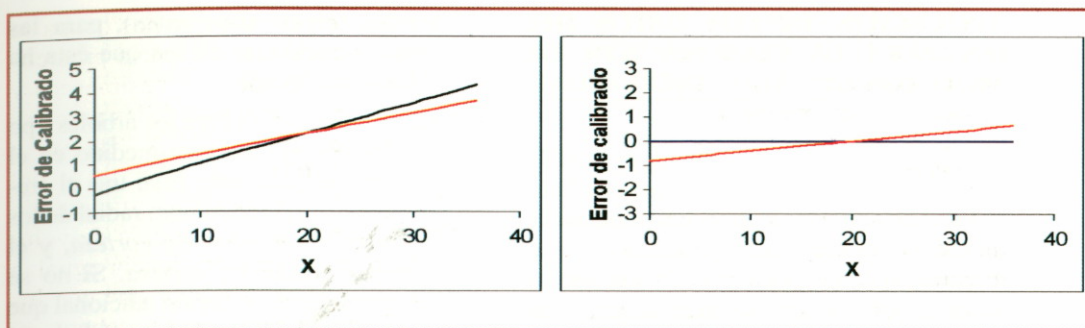


Figura 3. En la gráfica de la izquierda se muestra el valor real observado (línea negra) y el valor predicho por el modelo (línea roja). Si la predicción del modelo fuera perfecta el error cometido sería cero (línea negra de la gráfica de la derecha), pero como no es así debe corregirse con el factor de corrección que se deduce de la línea roja (gráfica de la derecha)

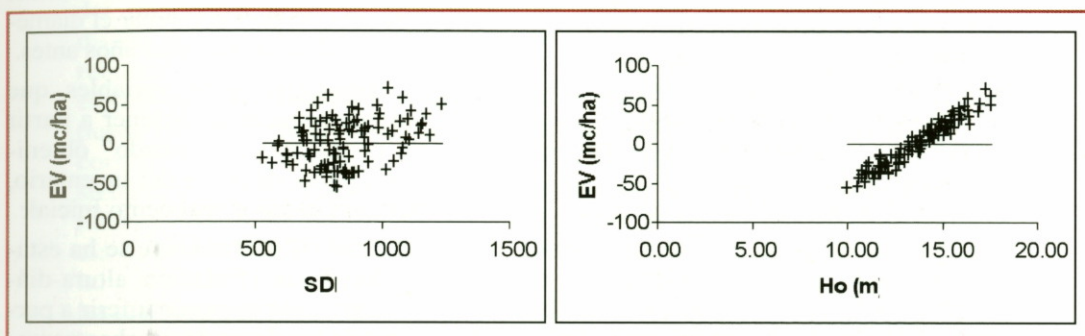


Figura 4. Relación entre el error del volumen y el SDI y la altura dominante, para las parcelas de los ensayos de claras del CIFOR-INIA

La relación entre el error cometido en la estimación del volumen (como diferencia entre el valor real y el predicho por el modelo) de las parcelas de claras con el modelo está claramente relacionado con la altura dominante, sin embargo no aparece una relación clara con el SDI (Figura 4). Por tanto, el factor de calibrado se estimará mediante una función lineal de la altura dominante. Una vez añadido el factor de calibración al modelo original el índice de eficiencia (EF) de este modelo se eleva hasta 0,9856, lo que muestra que de esta forma las estimacio-

nes del volumen serán más precisas. El modelo de producción definitivo es el siguiente:

$$G = 0.033 * N^{-0.107} * SDI^{1.161}$$

$$V = 0.168 * SDI^{0.913} * H_0^{0.413} - 215.069 + 15.685 * H_0$$

donde G es el área basimétrica en m^2/ha , V es el volumen en m^3/ha , SDI es el índice de densidad del rodal o de Reineke y H_0 es la altura dominante en m.

APLICACIÓN DE LOS DATOS DEL IFN PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS DE ÁRBOL INDIVIDUAL

Con los datos del inventario, es posible obtener ciertas variables de masa mediante los denominados *factores de expansión* en un momento dado. Por ello, si se toman árboles particulares de los que se es capaz de conocer su crecimiento, y se dispone de características del sitio donde se encuentra la parcela, la construcción de modelos de este tipo es posible: su mayor o menor bondad en ajuste viene dada por las variables descriptoras iniciales de que se pueda disponer.

En la actualidad, con los datos del segundo inventario forestal nacional (IFN2), la muestra de árboles que se podría tomar para intentar establecer un modelo de crecimiento individual en diámetro, corresponde exclusivamente a los árboles tipo de cada parcela, puesto que de ellos es de los únicos que se conoce el crecimiento radial del último quinquenio. Por otro lado, necesitamos disponer de variables (de árbol y masa) iniciales, antes del período de crecimiento. En la estimación de estas variables a partir de los datos de un solo inventario reside el principal problema para la construcción del modelo de tipo árbol individual, sobre todo, teniendo en cuenta que no siempre se está seguro de que durante los cinco años anteriores a la medición no se haya llevado a cabo ninguna labor selvícola.

En el caso de que se pueda partir del supuesto (justificado de algún modo) que en los últimos cinco años antes del inventario no se ha efectuado ninguna actividad selvícola en la parcela, se podrían llevar a cabo las siguientes estimaciones sobre los datos de partida iniciales:

- Respecto de las características iniciales de cada árbol (tipo), se podría contar con las variables:

- 1) Edad (cinco años antes), para las masas coetáneas en las que ésta ha sido establecida.
- 2) Diámetro inicial. Para los árboles tipo se conoce el diámetro medido en el inventario (diámetro final tras el crecimiento), el crecimiento radial de los últimos cinco años *sin corteza*, y el espesor medio de corteza. Si no se dispone de una relación adicional que relacione el diámetro de un árbol con su espesor de corteza a 1,30 m de altura para la especie, se podría asumir la hipótesis de que el crecimiento en espesor de la corteza durante los últimos cinco años ha sido proporcional al crecimiento radial del tronco. Con ello, se podría estimar el diámetro inicial del árbol cinco años antes.
- 3) Cualesquiera otras variables que seamos capaces de obtener a partir de ecuaciones "de estado" obtenidas a partir de datos del inventario, pero aplicadas al momento inicial:
 - altura, si previamente se ha establecido una relación altura-diámetro (que se puede inferir a partir de los datos de muchas parcelas que proporciona el propio inventario).
 - diámetro a 4 m de altura sobre el tronco, si previamente se ha establecido una relación del tipo 'diámetro normal - diámetro a 4 m de altura'
 - características de copa -reflejo del nivel de vitalidad del árbol (DYER Y BURKHART, 1987)-, si previamente se ha establecido algún modelo que relacione dichas características con otras variables, que suelen ser la edad del árbol, su diámetro y su altura (DYER Y BURKHART, 1987; COLIN Y HOULLIER, 1992; CAÑADAS, 2000). Sin embargo, se hace

notar que con los datos del inventario sólo se podría obtener un modelo relativo al diámetro medio de copa -medido en todos los árboles tipo-, pero no de magnitudes ligadas con la longitud de la misma, ya que la altura de la primera rama viva sólo está disponible en casos de árboles con una determinada conformación.

- Entre las características iniciales de la masa que se podrían estimar se encuentran:

- 1) Número inicial de pies por hectárea (N). Para la estimación del número de pies por hectárea en el momento del inventario, dado el particular diseño de las parcelas, habría que recurrir a los 'coeficientes de expansión'. El resultado obtenido puede considerarse el mismo que el correspondiente a cinco años antes, siempre y cuando el número de pies menores sea nulo, no haya presencia de árboles muertos en la parcela, y se tenga la seguridad que no se ha realizado ninguna labor selvícola en el último quinquenio.
- 2) La estimación del diámetro dominante, diámetro medio y área basimétrica cinco años antes del inventario constituye una operación muy delicada, pues estas variables se han de obtener a partir del dato de diámetro inicial de todos los pies de la parcela, y sólo se dispone de los diámetros iniciales estimados de 4 a 6 árboles por parcela (árboles tipo). Una solución sería hacer la suposición de que, dentro de cada parcela (donde en todos los árboles es homogénea la calidad de la estación y la densidad) el crecimiento radial es función lineal del diámetro actual; o lo que es igual, que el *status* del árbol no ha variado en los últimos cinco años. Se

fijaría así la relación a partir de los datos de los árboles tipo, estimándose después el diámetro inicial para cada árbol en la hectárea.

- 3) Altura dominante (H_0): se puede estimar si se cuenta con la edad, y con un modelo de calidad para las masas tratadas. Si no, se puede obtener a partir del valor que se haya estimado para D_0 , mediante la aplicación de una relación altura-diámetro.
 - 4) Índice de espaciamiento de Hart-Becking, una vez estimados N y H_0 .
 - 5) Índice de densidad de Reineke, para parcelas regulares, una vez que se conoce el diámetro medio.
 - 6) Factor de competencia de copas, si se dispone de alguna relación adicional para la especie que ligue el diámetro normal y el diámetro de copa para árboles que han crecido aislados.
- A partir de las estimaciones sobre variables de árbol y de masa anteriores, se pueden estimar el valor de las expresiones más habituales que caracterizan el *status* del árbol: d/D_0 ; d/H_0 ; G_{sup_i} .
 - La calidad de la estación se puede obtener a partir de algún modelo de calidad de estación existente para la especie y la región, siempre y cuando se disponga de la edad de la parcela, en casos de masa regular. Si no se dispone de la edad, se podría emplear algún modelo de calidad que se base en el empleo de parámetros ecológicos que aporta el inventario (exposición, altitud, pendiente, especies del cortejo, textura del suelo). Pero ello también supone la existencia de un modelo de calidad previo de este tipo, para la especie que se trate. Este tipo de modelos son muy escasos en la bibliografía española. Si no se dispone de ninguno de los dos anteriores, habría que recurrir a modelos de calidad que utilizan el diámetro

tricos que se toman son los mismos que los medidos en el inventario anterior. Una vez que se dispone de los datos del IFN3 se dispondrá de una potente base de datos que permitirá el desarrollo de modelos forestales, tanto de rodal completo como de árbol individual de forma más sencilla. Sin embargo, aún quedarán dos importantes lagunas en esta base de datos: no se dispondrá de la edad de la masa, muy importante para las masas regulares y coetáneas, ni de la calidad de estación. La ausencia de estas variables ha sido aprovechada en algunas ocasiones (ver, por ejemplo, el modelo PROGNANUS, STERBA Y MONSERUD, 1997) para desarrollar modelos aplicables tanto a masas regulares como irregulares. 🌲

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNEY, J.D. 1985. A modeling strategy for the growth projection of managed stands. *Canadian Journal of Forest Research* **15**, 511-518.
- BARTET, J.H.; BOLLIET, R. 1976. *Méthode utilisée pour la construction de tables de production à sylviculture variable*. Office National des Forêts, document 76-9. 90 pp.
- BRAVO, F.; HANN, D.W.; MAGUIRE, D.A. 2001. Impact of competitor species composition on predicting diameter growth and survival rates of Douglas-fir trees in southwestern Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* **31**, 2237-2247.
- BRAVO, F.; MONTERO, G. 2001. Site index estimation in Scots pine (*Pinus sylvestris*) stands in the High Ebro Basin (northern Spain) using soil attributes. *Forestry* **74**(4), 395-406.
- BRAVO, F.; MONTERO, G. 2002. High-grading effects on Scots pine volume and basal area in pure stands in northern Spain. *Annals of Forest Science* (en prensa)
- CAÑADAS, M.N. 2000. *Pinus pinea L. en el Sistema Central (valles del Tiétar y del Alberche): desarrollo de un modelo de crecimiento y producción de piña*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- CAÑADAS, M.N.; GARCÍA GÜEMES, C.; MONTERO, G. 1999. Relación altura-diámetro para *Pinus pinea* en el Sistema Central. *Congreso de Ordenación y Gestión sostenible de los montes*, Santiago de Compostela.
- COLIN, F.; HOULLIER, F. 1992. Branchiness of Norway spruce in northeastern France: predicting the main crown characteristics from usual tree measurements. *Annals of Forest Science* **49**, 511-538.
- CONDÉS RUIZ, S. 1997. *Simulación de parcelas arboladas con datos del Segundo Inventario Forestal Nacional*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- DANIELS, R.F.; BURKHART, H.E.; CLASON, T.R. 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research* **16**, 1230-1237.
- DECOURT, N. 1972. Méthode utilisée pour la construction rapide de tables de production provisoires en France. *Annales des Sciences Forestières* **29** (1), 35-48.
- DYER, M.E.; BURKHART, H.E. 1987. Compatible crown ratio and crown height models. *Canadian Journal of Forest Research* **17**, 572-574.
- EKÖ, P.M. 1985. *A growth simulator for Swedish forests, based on data from the national forest survey*. Dept. of Silviculture, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea, 224 pp + tablas (en sueco, con resumen, tablas y figuras en inglés)
- GARCÍA GÜEMES, C. 1999. *Modelo de simulación selvícola para Pinus pinea L. en la provincia de Valladolid*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- HAMILTON, G.J.; CHRISTIE, J.M. 1971. Forest managements tables (metrics). *Forestry Commission Booklet*, nº 48. Londres. 32 pp.+ tablas.
- HOLDAWAY, M.R.; BRAND, G.J. 1986. *An evaluation of Lake States STEMS85*. USDA For. Serv. - Research Paper NC-269. 10 pp.
- HUANG, S.; TITUS, S.J.; 1993. An index of site productivity for uneven-aged and mixed-species stands. *Canadian Journal of Forest Research* **23**, 558-562.
- HUANG, S.; TITUS, S.J. 1995. An individual tree diameter increment model for white spruce in Alberta. *Canadian Journal of Forest Research* **25**, 1455-1465.
- IBÁÑEZ ULARGUI, J.I. 1989. *El haya (Fagus sylvatica L.) en La Rioja. Silvicultura y ordena-*

- ción. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- ICONA. 1990. *Segundo Inventario Forestal Nacional. Explicaciones y métodos*. Madrid, 174 pp.
- LEJEUNE, P. 1996. Développement d'un modèle de type arbre appliqué à la croissance des peuplements feuillus irréguliers du sud de la Belgique. *Canadian Journal of Forest Research* **26**, 1838-1848
- MADRIGAL, A.; ÁLVAREZ, J.G.; RODRÍGUEZ, R. ROJO, A.; 1999. *Tablas de producción para los montes españoles*. Fundación Code del Valle de Salazar. Madrid. 253 pp.
- MEREDIEU, C. 1998. *Croissance et branchaison du Pin laricio (Pinus nigra Arnold ssp. laricio (poiret) Maire): élaboration et évaluation d'un système de modèles pour la prévision de caractéristiques des arbres et du bois*. Thèse. Université Claude Bernard -Lyon I-. Inédita. 250pp + Annexes.
- MONNESS, E.N. 1982. Diameter distributions and height curves in even-aged stands of Pinus sylvestris L. *Medd. Nor. Inst. Skogforsk* **36** (15), 1-43.
- MUNRO, D. 1974. Forest growth models. A prognosis *Royal Collego of Forestry, Sweden, Forest Research Notes* **30**
- ORTEGA, A. 1989. *Modelos de evolución de las masas de Pinus sylvestris L.* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- OTTORINI, J.M. 1978. Aspects de la notion de densité et croissance des arbres en peuplement. *Ann. Sci. For.* **35**, 299-320.
- PARDÉ, J.; BOUCHON, J. 1988. *Dendrométrie*. ÉNGREF. Nancy, 2^a ed. 328 pp.
- QUICKE, H.E.; MELDAHL, R.S.; KUSH, J.S. 1994. Basal area growth of individual trees: a model derived from a regional longleaf pine growth study. *Forest Science* **40**(3), 528-542.
- RÉGENT INSTRUMENT INC. 1997a. *WinDendro v 6.2. Reference*. Régent Instrument Inc., Quebec, 34 pp.
- RÉGENT INSTRUMENT INC. 1997b. *WinDendro v 6.2. Introduction Manual*. Régent Instrument Inc., Quebec, 39 pp.
- RÍO GAZTELURRUTIA, M. DEL. 1998. *Régimen de claras y modelo de producción para Pinus sylvestris L. en los Sistemas Central e Ibérico*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- ROJO, A.; MONTERO, G. 1996. *El pino silvestre en la Sierra de Guadarrama* MAPA, Madrid, 293 pp.
- ROJO, A.; MONTERO, G. 1994. Tablas de producción españolas. *Montes*, **38**. 35-42.
- SOARES, P.; TOMÉ, M.; SKOVSGAARD, J.P.; VANCLAY, J.K. 1995. Evaluating a growth model for forest management using continuous forest inventory data *Forest Ecology and Management* **71**: 215-265
- SPURR, S.H. 1952. *Forest Inventory*. New York. Ronald Press.
- STAGE, A.R. 1973. *Prognosis model for stand development*. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-137. 32 pp.
- STERBA, H.; MONSERUD, R.A. 1997. Applicability of the forest stand growth simulator PROGNANUS for the Austrian part of the Bohemian Massif. *Ecological Modelling*, **98** 23-34.
- STIELL, W.M. 1970. *Some competitive relations in a red pine plantation*. Dep. Fish. For., Can. For. Serv., Publ. 1275. 10 pp.
- TOMÉ, M.; BURKHART, H.E. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science* **35**(3), 816-831.
- VANCLAY, J. 1994. *Modelling forest growth and yield. Applications to Mixed Tropical Forests*. CAB International, 312 pp.
- VANCLAY, J.K.; SKOVSGAARD, J.P.; GARCÍA, O. 1996. Evaluating forest growth models *Proc. of Meeting of IUFRO S4.11.00, IUFRO XX World Congress, Tampere*, 11-22.
- WENSEL, L.C. MEERSCHAERT, W.J., BIGING, G.S. 1987. Tree height and diameter growth models for Northern California conifers. *Hilgardia* (Univ. of California Agric. Exp. Stn. Journal) **55** (8), 1-20.
- WYKOFF, W.R. 1990. A basal area increment model for individual conifers in the Northern Rocky Mountains. *Forest Science* **36**(4), 1077-1104
- WYKOFF, W.R.; CROOKSTON, N.L.; STAGE, A.R. 1982. *User's guide to the stand prognosis model*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-133. 112 pp.
- ZHANG, S.A.; BURKHART, H.E.; AMATEIS, R.L. 1997. The influence of thinning on tree height and diameter relationships in loblolly pine plantations. *Southern Journal of Applied Forestry* **21**(4), 199-205.