

# ANALISIS DE MODELOS DE PRODUCCION PARA *Populus x euramericana* EN LA CUENCA DEL DUERO

**F. BRAVO**

E.T.S.I.A. Sec. Ing. Montes  
Universidad de Valladolid  
Av. de Madrid, 57. 34004 Palencia

**J.M. GRAU**

**F. GONZALEZ ANTOÑANZAS**

Area de Selvicultura y Mejora Forestal. SGIT. CIFOR-INIA  
Apdo. 8011 - Madrid

## RESUMEN

A partir de datos procedentes de una experiencia de tratamientos culturales en *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador" (plantado a 8 x 5 m) se ha desarrollado un modelo de producción y crecimiento aplicable en la Cuenca del Duero. Los criterios para seleccionar el modelo han sido el coeficiente de determinación, el coeficiente de variación y la consistencia biológica de las predicciones realizadas con el mismo. El modelo elegido es el de Clutter-Schumacher, modificado mediante la eliminación de la variable referida a la densidad porque en masas forestales que no son objeto de claras está correlacionada con la edad. La validación de este modelo se ha realizado a partir de datos de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214" (plantado 6 x 6 m).

**PALABRAS CLAVE:** Modelo  
Producción  
Crecimiento  
Choperas  
Cuenca del Duero  
España  
*Populus x euramericana*

## INTRODUCCION

El sector forestal en España y en la Unión Europea presenta un balance negativo, puesto que la demanda de madera supera ampliamente la producción; aunque la última ampliación de la Unión Europea, con la inclusión de Suecia, Finlandia y Austria, puede equilibrar parcialmente este déficit, parece claro que sigue siendo

---

Recibido: 26-1-96

Aceptado para su publicación: 4-7-96

necesario una mejor utilización de nuestros recursos forestales; cuanto mayor sea la producción de madera en las tierras agrícolas abandonadas, mayor será la superficie de terrenos tradicionalmente forestales que se puedan dedicar a fines proteccionistas, tal como demandan los criterios conservacionistas de la sociedad actual. En un marco forestal tan poco productivo como el español la populicultura representa una de las más grandes oportunidades para suministrar materia prima a las industrias trituradoras y de desarrollo; además deberían buscarse nuevas alternativas para la industria del aserrío, y de esta forma combatir las fluctuaciones del mercado del desarrollo, para lo cual puede ser muy útil el disponer de un modelo de producción, con el fin de poder cuantificar las producciones a distintas edades y calcular las respectivas rentabilidades. Por otra parte, la política europea de incentivar el abandono de los cultivos agrícolas en beneficio de la producción forestal, allí donde sea posible, supone un estímulo para el cultivo del chopo. En España se ha plasmado, esta política de incentivos, a través del Real Decreto 378/1993 del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, y concretamente en el ámbito de Castilla y León mediante el 'Programa regional de forestación de tierras agrarias y mejora de los bosques en zonas rurales'. La cuenca del Duero presenta, dentro de España, un gran potencial para la populicultura, especialmente su extremo noroeste (León, Zamora, Palencia y Valladolid). Las riberas del Esla, Orbigo, Porma, Carrión, Pisuerga y Duero, junto con ríos menores como el Valdavia o el Boedo, representan zonas aptas para la populicultura sólo parcialmente utilizadas en la actualidad. Por todo lo anterior, la Junta de Castilla y León y la Confederación Hidrográfica del Duero estimulan la implantación de choperas a través de contratos de colaboración con los propietarios de terrenos (consorcios y convenios), de la entrega de ayudas y subvenciones, tanto a fondo perdido como con la devolución a bajo interés, y del anticipo de rentas al populicultor para que éste no espere hasta el final del turno para recibir los beneficios de las choperas. Para las administraciones y los propietarios particulares es indudable el interés que presenta el disponer de un modelo de producción que permita predecir la productividad y así poder estudiar los balances de gastos e ingresos en las choperas, y por tanto la rentabilidad que se puede esperar de ellas.

Cualquier modelo de producción, tanto en forma de tabla como de ecuación, no es un dogma de fe sino una orientación para la gestión forestal (Rojo, Montero, 1994); aun así los modelos de producción pueden servirnos para:

- Fijar los turnos de aprovechamiento óptimos, que pueden ser, para estas masas, tecnológicos, económicos o de máxima renta en especie.

- Comparar su producción con los usos alternativos (p. ej., cultivos agrícolas de regadío, implantación de praderas,...) en la misma estación y así poder hacer balances económicos ajustados.

- Conocer a priori la producción esperada a cada edad y así poder adelantar subvenciones y rentas en la cuantía adecuada o planificar las inversiones precisas en industrias forestales.

- Poder planificar un régimen de cortas adecuado para no saturar el mercado por un exceso de oferta o estrangular al sector transformador por un déficit de mate-

rias primas.

- La utilización en las choperas de los modelos de producción es fundamental para el estudio de la influencia sobre la calidad de la estación, y por tanto rentabilidad de los diferentes tratamientos (podas, laboreo, fertilizaciones, aplicaciones de herbicidas, riego,...), por otro lado el poder observar si éstos hacen que una misma masa cambie de calidad de estación, puede abrir una nueva vía a la investigación en la populicultura.

La modelización de la producción en las choperas se enfrenta, paradójicamente, con la rapidez del crecimiento de estas masas; el rápido desarrollo de nuevos clones y métodos de cultivos, antes de haber acumulado conocimientos suficientes para realizar adecuados modelos, impide construir y evaluar modelos de producción utilizables. La solución a este problema no es construir un modelo diferente en cada ocasión sino ajustar un modelo adecuado a los datos disponibles y después calibrarlo para la situación selvícola actual. En el caso concreto que nos ocupa se dispone de abundantes datos de parcelas de investigación, del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador" plantado a un marco de 8 x 5 metros (250 chopos/ha), mientras que la populicultura actual se ha decantado por el uso de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214" con un marco de plantación de 6 x 6 metros (278 chopos/ha). Castillo, Padró (1987), Padró (1992) han estudiado las diferencias entre uno y otro clon, llegando a la conclusión de que en cuanto a productividad las diferencias son mínimas, en torno a un 3 p.100 a favor del clon "I-214", lo cual no es extraño pues uno de los progenitores empleados en el desarrollo del clon "Campeador" era "I-214". Las posibles diferencias productivas en razón del marco se pueden obviar utilizando variables de masa en lugar de variables individuales, partiendo de la hipótesis de que estas densidades no están fuera de los límites de Assmann (Assmann, 1970). El diferente reparto de la producción, por ser diferente el número de pies por hectárea, influye sobre el valor económico de la producción pero no en principio sobre el montante total de la misma.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de producción adecuado a la populicultura actual (*Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214" con un marco de plantación de 6 x 6 metros), a partir de los datos más completos disponibles en este momento (*Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador" plantado a un marco de 8 x 5 metros), aplicable a la Cuenca del Duero.

## MATERIAL Y METODOS

Los datos utilizados en este trabajo provienen de las mediciones realizadas durante 13 años en las parcelas de ensayos de producción de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador" instaladas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) en colaboración con el Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), aunque estas parcelas se diseñaron para

estudiar el efecto de diferentes técnicas sobre la producción, y no para eleborar un modelo de producción, representan un amplio rango de niveles de productividad por lo que han sido utilizadas. Dichas parcelas estaban situadas en la margen derecha del río Esla, en los términos municipales de Gradefes (42° 30' N, 5° 12' O y 825 m) y Villasabariego (42° 31' N, 5° 22' O y 790 m) de la provincia de León.

Las parcelas, cuyos datos utilizamos, fueron plantadas, con *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador", entre febrero y marzo de 1968. La planta empleada tenía raíz y tallo de dos años (R2T2). La plantación se realizó a raíz profunda, siendo la profundidad media de plantación de 2,14 m en las parcelas de Villasabariego y de 2,02 m en las de Gradefes. El marco de plantación utilizado fue de 8x5 m (250 chopos/ha). El suelo es de origen aluvial (ranker aluvial) clasificándose respecto a la textura como tierra 'franca bastante arenosa', con muy buena permeabilidad, siendo su capacidad de retención de agua (0,28) mediocre. La reacción del suelo es básica (el pH oscila entre 8,1 y 8,5 en suspensión acuosa) y su fertilidad mineral es escasa. La relación C/N es de 10 en las parcelas de Gradefes y de 12 en las de Villasabariego (Nicolás, Sánchez Palomares, 1970). De acuerdo con la taxonomía de Allué (1990) el tipo fitoclimático de estas parcelas es el VI(IV)<sub>2</sub> (Nemoromediterráneo genuino continental occidental) que en España corresponde a las orlas interiores de media montaña. Las parcelas se distribuyeron sobre el terreno según un diseño experimental de bloques aleatorios con cuatro repeticiones; cada parcela constaba de 30 chopos, midiéndose sólo los ocho centrales, para eliminar el efecto borde. Se ensayaron ocho tratamientos (incluyendo un testigo que no ha sido utilizado en este trabajo). Los datos utilizados proceden de los siguientes tratamientos: 00F1 (fertilización profunda al plantar, sin laboreo), 00LB (un laboreo al año, en el mes de mayo), 00LA (tres labores anuales, en los meses de marzo, mayo y julio), LBF1 (fertilización profunda al plantar y un laboreo anual, en el mes de mayo), LBF2 (fertilización profunda al plantar y superficial los años 2 y 10, y un laboreo anual, en el mes de mayo), LAF1 (fertilización profunda al plantar, y tres labores anuales, en marzo, mayo y julio) y LAF2 (fertilización profunda al plantar y superficial los años 2 y 10, y tres labores anuales, en marzo, mayo y julio), (González Antoñanzas, 1983). Aunque el uso de estos datos puede hacer prever problemas de autocorrelación en la elaboración de modelos de producción, éstos si existen no serán mayores que cuando se utilizan datos de análisis de troncos o de parcelas permanentes; las parcelas que utilizamos no son nada más que eso: parcelas permanentes.

Las mediciones realizadas, sobre los árboles objeto de estudio, han sido el diámetro normal con corteza en cruz (en mm) y la altura total (en cm). Todas las mediciones se realizaron antes de iniciarse el periodo vegetativo. El proceso seguido con los datos ha sido el siguiente:

- 1.- Eliminar los datos que correspondían a otros clones o existían dudas sobre su fiabilidad.
- 2.- Calcular el diámetro normal medio de cada árbol (D) y la sección normal (Sn).

- 3.- Calcular el volumen unitario mediante la expresión (González Antoñanzas, 1986):

$$V = -12,96377 + 0,03167 D^2H \quad [1]$$

donde, V es el volumen maderable unitario de fuste con corteza, en  $dm^3$ , hasta un diámetro en punta delgada de 7 cm D es el diámetro normal con corteza, medio, en cm y H es la altura total, en m.

- 4.- Eliminar todos los datos con volumen unitario igual o menor que cero.  
5.- Calcular el área basimétrica, en  $m^2/ha$ , mediante la expresión:

$$GI = \left( \frac{\sum S_n}{n} \right) * 250 \quad [2]$$

donde GI es el área basimétrica, en  $m^2/ha$ , a la edad i, para cada parcela,  $S_n$  es la sección normal, en  $m^2/pie$  y n es el número de pies utilizados para calcular el sumatorio de  $S_n$ .

- 6.- Calcular el volumen total, en  $dm^3/ha$ , mediante la expresión:

$$V = \left( \frac{\sum v}{n} \right) * 250 \quad [3]$$

donde V es el volumen total, en  $dm^3/ha$ , a la edad i, para cada parcela, v es el volumen unitario, en  $dm^3/pie$  y n es el número de pies utilizados para calcular el sumatorio de v.

7.- Eliminar todos los datos con volumen total o área basimétrica igual o menor que cero, y aquellos que representaban una disminución, de volumen total o de área basimétrica, respecto al año anterior (i-1).

Tras este proceso quedaron 354 datos disponibles, cada uno de los cuales representa una observación en un año concreto en una parcela determinada. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las características de estos datos.

**TABLA 1**

**CARACTERISTICAS DE LOS DATOS UTILIZADOS EN EL  
DESARROLLO DEL MODELO DE PRODUCCION PARA  
*Populus x euramericana* EN LA CUENCA DEL DUERO**  
*Data characteristics in yield modelling for Populus x euramericana  
in the Duero basin*

	EDAD	VOLUMEN	GI
Máximo	15	351.984	32,13
Mínimo	3	503,7	1,22
Media	--	108.911	13,51470
Desv. típica	--	84.240	7,61092
Observac.	354	354	354

Edad, en años; volumen, en  $dm^3/ha$ ; GI, en  $m^2/ha$   
Age, in years; volume, in  $dm^3/ha$ ; GI, in  $m^2/ha$

La calidad de una estación determinada ocupada por una especie dada puede determinarse mediante mediciones repetidas en el tiempo o mediante indicadores productivos indirectos (Ortega, Montero, 1988). Entre estos últimos se distinguen los factores intrínsecos a la masa forestal, como la altura (dominante o media), el crecimiento, el volumen total al final del turno, el área basimétrica,... (González Antoñanzas, 1986; Ortega, Montero, 1988; Bengoa, 1992), y los factores extrínsecos como el clima, la litología, el tipo de suelo, ... (Ortega, Montero, 1988; Franc, Curt, 1990; Worrell, Malcolm, 1990a, 1990b). En las masas que habitualmente no son objeto de claras se ha empleado como índice de calidad el área basimétrica (Hall, 1983), ejemplo de este método en España son los trabajos en masas de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier 'I-214' (Padró, 1982), utilizando la circunferencia normal, y 'Campeador' (González Antoñanzas, 1986), *Quercus pyrenaica* Willd. (Bengoa, 1992) y *Quercus faginea* Lamk. (San Miguel, 1986), en el último caso empleando el área de cepa en lugar del área basimétrica.

El índice de sitio (SI) es el valor que toma el índice de calidad, en este caso el área basimétrica (en m<sup>2</sup>/ha), a una edad determinada denominada edad típica. Para fijar la edad típica clásicamente se ha recurrido a la mitad del turno o a los 50 años para el caso de las especies forestales de turnos medios o largos (Ortega, Montero, 1988); en especies de crecimiento rápido, concretamente en masas de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia, se ha empleado como edad típica los 20 años (Rodríguez Soalleiro *et al.*, 1993). Está claro que ninguna de estas opciones es válida en el caso de *Populus x euramericana*, por tanto se ensayan dos edades típicas alternativas: cinco y diez años. El criterio para elegir la edad típica adecuada es conjunto con la elección del número de calidades, por lo que se explicará más adelante.

Las curvas de calidad pueden clasificarse en anamórficas y polimórficas. Las curvas anamórficas se caracterizan por ser proporcionales unas a otras, mientras que en las polimórficas esta proporcionalidad no existe. En este trabajo las curvas de calidad construidas son del tipo anamórfico, pues aunque las curvas de calidad son básicamente polimórficas (Alder, 1980), las primeras ya han demostrado su utilidad y bondad (Pita, 1966; Carmean *et al.*, 1989; Madrigal *et al.*, 1992). El método de construcción empleado es el de la curva guía (Alder, 1980). El ajuste de la curva guía se ha realizado mediante regresión lineal, aplicando el método de los mínimos cuadrado, con la instrucción PROC REG, del paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System Inc., 1985), para ello previamente se han linealizado los modelos elegidos para la curva guía. Los modelos ensayados han sido el modelo de Chapman-Richards [6] y el modelo de Korf [7], también conocido como de Schumacher aunque el primero lo describió antes (Zeide, 1993); se han rechazado los modelos polinómicos por carecer de base biológica (Zeide, 1993), ya que un modelo de producción de cualquier ser vivo debe poder expresarse en términos de anabolismo y catabolismo.

$$y = a [1 - e^{-bt}]^c \quad [6]$$

$$y = ae^{-br^c} \quad [7]$$

En los modelos anteriores, [6] y [7],  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros a obtener,  $e$  es la base de los logaritmos naturales,  $t$  es el tiempo (la edad en años, en el caso de las masas forestales),  $e$  y es la variable dependiente estudiada. Para realizar el ajuste por regresión lineal además de la linealización se han dado valores al parámetro  $b$  del modelo de Chapman-Richards [6], y al parámetro  $c$  del modelo de Korf [7]. Los modelos linealizados se presentan en las ecuaciones [8] (modelo de Chapman-Richards) y [9] (modelo de Korf). La Tabla 2 muestra los valores ensayados en cada caso.

$$\text{LnGI} = \text{Lna} + c\text{Ln} [1 - e^{-bt}] \quad [8]$$

$$\text{LnGI} = \text{Lna} - by^{-c} \quad [9]$$

**TABLA 2**

**MODELOS DE CURVA GUIA ESTUDIADOS Y VALORES DE  $R^2$  Y CV OBTENIDOS, PARA *Populus x euramericana* EN LA CUENCA DEL DUERO**  
*Site curve models studied and  $R^2$  and CV values obtained for Populus x euramericana in the Duero basin*

MODELO	PARAM. FIJADO	$R^2$	CV
Chapman-Richards, linealizado	$b = 1$	0,6322	19,57675
	$b = 0,5$	0,8088	14,11618
	$b = 0,375$	0,8547	12,30420
	$b = 0,25$	0,8088	10,80385
	$b = 0,2$	0,8951	10,45581
	$b = 0,175$	0,8970	10,36009
	<b><math>b = 0,15</math></b>	<b>0,8978</b>	<b>10,32102</b>
	$b = 0,125$	0,8974	10,33904
	$b = 0,1$	0,8960	10,41199
	Korf, linealizado	$c = 1$	0,8869
$c = 0,75$		0,8946	10,47834
$c = 0,625$		0,8963	10,39600
$c = 0,6$		0,8964	10,38878
$c = 0,575$		0,8965	10,38470
$c = 0,55$		0,8965	10,38377
$c = 0,525$		0,8965	10,38601
$c = 0,5$		0,8964	10,39141
	$c = 0,25$	0,8918	10,61376

El criterio elegido para determinar el modelo adecuado ha sido el de máximo coeficiente de determinación. Una vez que el modelo ha sido elegido por este criterio se ha analizado, el modelo, estudiando el estadístico D de Cook para detectar observaciones influyentes sobre la variable dependiente, Dfbetas para estudiar las observaciones influyentes sobre las variables independientes, Covratio para estudiar la influencia de las distintas observaciones sobre la precisión de los coeficientes de regresión estimados, y los gráficos de residuos, frente a los valores predichos ( $\hat{y}$ ) para detectar errores de especificación (Rawling, 1988; Statistical Analysis System Inc., 1985; Peña, 1994). Los valores de corte de los estadísticos anteriores se han fijado en  $2/\sqrt{n}$  para Dfbetas y en  $1 \pm 3(p'/n)$  para Covratio (Belsley *et al.*, 1980). En el caso del estadístico D de Cook se toma como valor de corte  $4/n$ , obtenido por Rawling (1988), a partir de la propuesta de Belsley *et al.* (1980) de límite de corte para Dffits, que está relacionado linealmente con D de Cook. En las expresiones anteriores  $n$  es el número de observaciones,  $p'$  es el sumatorio de los elementos de la diagonal de la matriz Hat (ver ec. 10 y 11), y  $k$  es el número de parámetros a estimar. El estadístico Dffits no se ha utilizado porque al ser sus resultados de interpretación prácticamente idéntica al estadístico D de Cook, no es preciso usar más de uno de estos estadísticos simultáneamente (Rawling, 1988).

$$p' = \sum v_{ii} = k + 1 \quad [10]$$

$$v_{ii} = x_i' (X' X)^{-1} x_i \quad [11]$$

El número de calidades depende de la cantidad y calidad de los datos disponibles; en este caso se han ensayado tres posibilidades distintas (3, 4 y 5 calidades), como además se han ensayado dos edades típicas alternativas (5 y 10 años), resulta que se han ensayado seis soluciones distintas para determinar las curvas de calidad. El criterio para determinar la solución adecuada ha sido doble:

1.- Mayor número de aciertos en la predicción de la calidad; entendiendo por acierto cuando la calidad predicha a la edad  $i$  coincide con la calidad al final del turno; es decir, es una medida de la constancia de la predicción de la calidad.

2.- Reparto homogéneo de las observaciones por calidades, de manera que no hubiese calidades muy poco representadas.

Con el fin de fijar el sistema de funciones que define cada conjunto de curvas de calidad lo que se ha hecho es dividir el rango de área basimétrica a la edad típica en tantas clases iguales como calidades se pretendían obtener; para después hacer pasar la curva de calidad por el centro de cada una de estas clases.

Los modelos que se pretenden obtener son determinísticos y lineales; dentro de éstos, dos opciones han sido consideradas: un único modelo, con el SI incluido como variable independiente, o varios modelos, uno por calidad. Los modelos con el SI incluido como variable independiente estudiados han sido el de Clutter (1963), que proviene de una ecuación propuesta por Schumacher (1939), y el de Mendoza, Gumpal (1987). La formulación de los modelos de Clutter-Schumacher [12] y de Mendoza-Gumpal [13] se presenta a continuación:



$$\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 SI + \beta_2 t^{-1} + \beta_3 \text{Ln}GI \quad [12]$$

$$\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 SI t^{-1} + \beta_2 \text{Ln}t + \beta_3 \text{Ln}GI \quad [13]$$

donde,  $\text{Ln} V$  es el logaritmo neperiano del volumen (en  $\text{dm}^3/\text{ha}$ ),  $SI$  es el índice de sitio,  $t$  es la edad y  $\text{Ln} GI$  es el logaritmo neperiano del área basimétrica a la edad  $i$  (en  $\text{m}^2/\text{ha}$ ). Al estar trabajando con masas forestales en la que la densidad, expresada en número de pies por hectárea, es constante se han eliminado las variables que representan a la densidad de la masa, quedando los modelos anteriores de la siguiente forma:

$$\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 SI + \beta_2 t^{-1} \quad [12']$$

$$\text{Ln}V = \beta_0 + \beta_1 SI t^{-1} + \beta_2 \text{Ln}t \quad [13']$$

Las variables independientes de los modelos anteriores han sido objeto de un análisis de correlación mediante el coeficiente de Pearson aplicando el procedimiento PROC CORR del paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System Institute Inc., 1985).

Los modelos ensayados para cada calidad han sido los de Chapman-Richards [6] y el de Korf [7], debidamente linealizados. En este caso para cada calidad se han ensayado diferentes valores del parámetro  $b$  del modelo de Chapman-Richards y del parámetro  $c$  del modelo de Korf (Tabla 3). Para la elección del mejor modelo dentro de cada calidad se ha recurrido al mismo procedimiento descrito al hablar de la curva guía, es decir un mayor coeficiente de determinación. La elección de la mejor alternativa en cuanto a modelo de producción, un único modelo con el índice de sitio como variable independiente o un conjunto de modelos (un modelo por calidad), se ha basado en que las predicciones obtenidas por cada alternativa sean biológicamente razonables (Vanclay, 1994). Los criterios para estudiar el comportamiento de las dos alternativas han sido la estimación de la producción y del crecimiento medio anual (en  $\text{dm}^3/\text{ha}$ ) y el cálculo del turno de máxima renta en especie. El modelo así elegido ha sido analizado estadísticamente de la misma manera que la curva guía y evaluado a partir de doce datos obtenidos en parcelas de ensayos de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214" plantados a raíz profunda con un marco de 6 x 6 metros (278 árboles/ha) situadas en Zamadueñas (Valladolid), Cifuentes de Rueda y Villanueva de las Manzanas (León); en las citadas parcelas se estudiaron el comportamiento de los clones, el laboreo y la calidad de la estación y el abonado, laboreo y aplicación de herbicidas, respectivamente (González Antoñanzas, Domingo, 1987; Grau, González Antoñanzas, 1992).

A partir de los resultados obtenidos de las citadas parcelas y para el modelo linealizado se ha estudiado el comportamiento de sus residuos (diferencias entre los valores observados y los valores estimados por el modelo). Si el modelo se ajusta a los datos utilizados para su evaluación los residuos ( $e_i$ ) deben ser normales, tener media igual a cero y varianza igual al cuadrado medio del error (CME) del mode-

lo de regresión. Para calcular ésto se ha recurrido al procedimiento PROC UNIVARIATE del paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System Institute Inc., 1985); la normalidad se estudia, dentro de este procedimiento, a través del estadístico Skewness, que toma el valor cero cuando la simetría es perfecta, y del test de Shapiro-Wilk, utilizado cuando el número de datos es menor de 51. Si el valor del estadístico W, de Shapiro-Wilk, es pequeño se debe rechazar la hipótesis nula, en este caso la normalidad de los residuos; es importante tener en cuenta que W debe ser mayor que cero y menor o igual a uno.

**TABLA 3**

**VALORES DE LOS PARAMETROS  $b$  Y  $c$  QUE SE HAN ESTUDIADO  
PARA OBTENER EL MODELO DE PRODUCCION PARA CADA  
CALIDAD DE MASAS DE *Populus x euramericana*  
EN LA CUENCA DEL DUERO**

*Values of parameters  $b$  and  $c$  studied in modelling by site quality for  
*Populus x euramericana* in the Duero basin*

MODELO	PARAM. FIJADO	CAL. I	CAL. II	CAL. III	CAL. IV
Chapman-Richards, linealizado	b	1	1	1	1
		0,5	0,5	0,5	0,5
		0,25	0,25	0,3	0,25
		0,2	0,2	0,25	0,225
		0,175	0,195	0,235	0,2
		0,16	0,19	0,225	0,19
		0,15	0,175	0,2	0,175
		0,125	0,15	0,15	0,15
Korf, linealizado	c	0,1	0,125	0,125	0,125
		1	1	1	1
		0,75	0,95	0,99	0,85
		0,72	0,925	0,985	0,84
		0,71	0,915	0,98	0,835
		0,7	0,9	0,975	0,83
		0,65	0,875	0,95	0,825
		0,6	0,85	0,9	0,82
		0,5	0,75	0,78	0,75
		0,25	0,5	0,5	0,5

## RESULTADOS

El modelo para curva guía que tiene, entre los estudiados, un mayor coeficiente de determinación es el de Chapman-Richards, con el parámetro b igual a 0,15. En la Tabla 3 se muestran los modelos estudiados y los valores de  $R^2$  y CV obtenidos. En la Tabla 4 se muestra el análisis de la varianza y la estimación de los parámetros del modelo preseleccionado como curva guía. El análisis de las observaciones influyentes en el modelo preseleccionado como curva guía ha dado los siguientes valores de corte

$$DFBETAS_{j(i)} > \frac{2}{\sqrt{354}} = 0,10629; 0,983051 < COVRATIO < 1,016949; D'COOK = 0,011299$$

### TABLA 4

#### PARAMETROS AJUSTADOS Y COEFICIENTES FUNDAMENTALES DEL AJUSTE MEDIANTE REGRESION LINEAL MULTIPLE DE LA CURVA GUIA Y DE LOS MODELOS DE PRODUCCION PARA MASAS DE *Populus x euramericana* EN LA CUENCA DEL DUERO

*Parameters fitted and main coefficient of multiple linear model for basal area growth curve and yield models for Populus x euramericana in the Duero basin*

	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$R^2$	CV	CME	CMM	n
Curva guía	3,436	2,690	--	0,8978	10,3210	0,060	185,682	354
Mod. de Clutter-Schum	11,770	0,102	-16,954	0,9784	1,8027	0,039	315,020	354
Mod. de Korf I	14,659	-13,246	--	0,9918	1,0376	0,014	179,250	105
Mod. de Korf II	13,808	-15,791	--	0,9922	0,7858	0,008	117,807	116
Mod. de Korf III	13,279	-17,124	--	0,9907	1,2975	0,019	197,049	97
Mod. de Korf IV	13,584	-17,767	--	0,9522	3,4545	0,122	82,678	36

Las observaciones influyentes según el estadístico D de Cook se concentran en las parcelas que corresponden a los tratamientos 00F1 y LAF2, por lo que no pueden considerarse datos atípicos que proceda eliminar, ya que se deben a los diferentes efectos de los tratamientos estudiados en las parcelas utilizadas para la construcción de este modelo. Los estadísticos Covratio y Dfbetas apenas detectan observaciones atípicas, aunque estas se concentran en las primeras edades de la masa, sin distinción de tratamientos. El gráfico de residuos frente a los valores predichos no denota ninguna alteración en las hipótesis básicas del modelo general de regresión, por lo que la transformación logarítmica utilizada se considera adecuada. Una vez adoptada la curva guía se han obtenido las curvas de calidad y curvas límites para las combinaciones de edad típica (5 y 10 años) y de número de calidades (3, 4 y 5)

planteadas. Las Tablas 5 y 6 muestran, respectivamente, el número de aciertos y fallos en la predicción de la calidad y la distribución de los datos por calidades; esto último tiene importancia para la determinación posterior del modelo, o modelos, de producción. A la vista de estas Tablas se opta por tomar como solución las curvas de cuatro calidades y edad típica 10, que aunque no es la mejor solución cumple aceptablemente todos los requisitos; este número de calidades coincide con el elegido por Padró (1982) para el clon 'I-214' en el valle medio del Ebro. En la Figura 1 se muestran las curvas de calidad y las curvas límites adoptadas en este trabajo.

**TABLA 5**

**NUMERO DE ACIERTOS Y FALLOS EN LA PREDICCIÓN DE LA CALIDAD, PARA MASAS DE *Populus x euramericana* EN LA CUENCA DEL DUERO, DE LA ESTACION POR NUMERO DE CALIDADES Y EDAD TÍPICA**

*Correct and incorrect values in the prediction of site quality for Populus x euramericana in the Duero basin based on quality number and base age*

Número de calidades	Edad típica, 5		Edad típica, 10	
	Aciertos	Fallos	Aciertos	Fallos
3	250	104	237	117
4	228	126	236	118
5	202	152	196	158

**TABLA 6**

**NUMERO DE OBSERVACIONES POR CALIDAD EN LAS ALTERNATIVAS ESTUDIADAS PARA LAS MASAS DE *Populus x euramericana* EN LA CUENCA DEL DUERO**

*Data numbers for site quality in the options studied for Populus x euramericana in the Duero basin*

Edad típica	Número de calidades	Calidades				
		I	II	III	IV	V
5	3	193	139	22	--	--
	4	155	113	74	11	--
	5	121	103	87	34	9
10	3	153	140	61	--	--
	4	105	116	97	36	--
	5	70	112	77	72	23

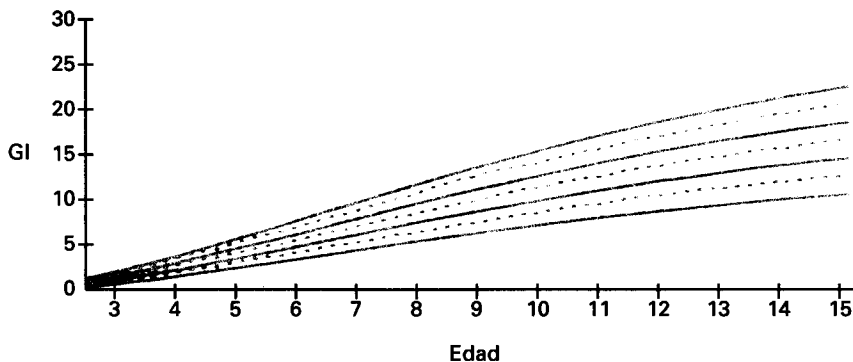


Fig. 1.- Curvas de calidad para *Populus x euramericana* en la Cuenca del Duero  
Site curves for *Populus x euramericana* in the Duero basin

En los modelos de producción con el SI como variable independiente los análisis de correlación realizados muestran que existe una alta correlación entre las variables independientes del modelo de Mendoza-Gumpal (ecuación 13'), por lo que este modelo es rechazado. Las variables independientes del modelo de Clutter-Schumacher (ecuación 12') no presentan correlación entre ellas. La Tabla 7 muestra los resultados de estos análisis de correlación. En la Tabla 4 se presenta el análisis de la varianza y los parámetros estimados del modelo de Clutter-Schumacher y del modelo de Korf linealizado que ha sido siempre el elegido, variando la constante  $c$ , que se fija a priori, para cada calidad, así se ha elegido el modelo con  $c=0,7$  para la calidad I,  $c=0,9$  para la calidad II,  $c=0,985$  para la calidad III y  $c=0,85$  para la calidad IV. La evolución de la producción con la edad estimada a partir del modelo de Clutter-Schumacher se presentan en la Figura 2. Para los modelos de Korf seleccionados para cada calidad la producción se muestra en la Figura 3; el turno de máxima renta en especie aplicando el modelo de Clutter-Schumacher es igual a 16.95 años, es decir oscila entre 16 y 17 años, mientras que utilizando los modelos de Korf el turno de máxima renta en especie es de 24,08, 19,09, 17,61 y 24,38 años para las calidades I, II, III y IV, respectivamente. El comportamiento de las dos alternativas como modelo de producción para masas de *Populus x euramericana* en la Cuenca del Duero (el modelo de Clutter-Schumacher y los modelos de Korf), en cuanto a la producción y al crecimiento medio es razonable de acuerdo con las experiencias acumuladas sobre este tipo de masas (González Antoñanzas, 1986); en cambio en cuanto al turno de máxima renta en especie los modelos de Korf presentan un comportamiento errático mientras que el modelo de Clutter-Schumacher muestra un valor razonable para las masas consideradas (González Antoñanzas, 1986). La simplificación introducida al considerar el SI constante, lo que en estas masas puede no ser cierto debido a los cuidados culturales (labores y fertilizacio-

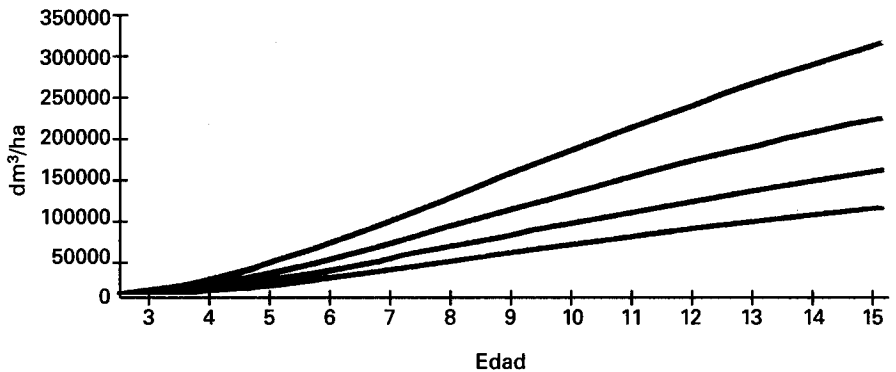
nes) que se les aplica o a las fluctuaciones de la capa freática, es la única solución posible pues en este momento no se conoce la evolución del SI con la edad, si es que existe un patrón regular para esta evolución.

**TABLA 7**

**COEFICIENTES DE CORRELACION DE PEARSON ENTRE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES DE LOS MODELOS DE MENDOZA-GUMPAL Y DE CLUTTER-SCHUMACHER**

*Pearson correlation coefficient for independent variables of Mendoza-Gumpal and Clutter-Schumacher*

	SI <sup>t-1</sup>	Ln t		SI	t <sup>-1</sup>
SI <sup>t-1</sup>	1,00000	-0,88496	SI	1,00000	0,02412
Ln t	-0,88496	1,00000	t-1	0,02412	1,00000



**Fig. 2.— Producción estimada, por edad, en  $\text{dm}^3/\text{ha}$  utilizando el modelo de Clutter-Schumacher para masas de *Populus x euramericana* en la Cuenca del Duero**  
*Yield estimates by age, in  $\text{dm}^3/\text{ha}$  using the Clutter-Schumacher model for *Populus x euramericana* in the Duero basin*

El análisis de las observaciones influyentes en el modelo de producción seleccionado ha dado los mismos valores de corte que en el caso de la curva guía de la curva de calidad porque el número de observaciones empleadas en la construcción de ambos modelos es el mismo. Las observaciones influyentes según el estadístico D de Cook se concentran en las parcelas que corresponden a los tratamientos 00F1, por lo que no pueden considerarse datos atípicos que deban ser eliminados; el tratamiento 00F1 ya dió lugar a observaciones influyentes en la curva guía. El

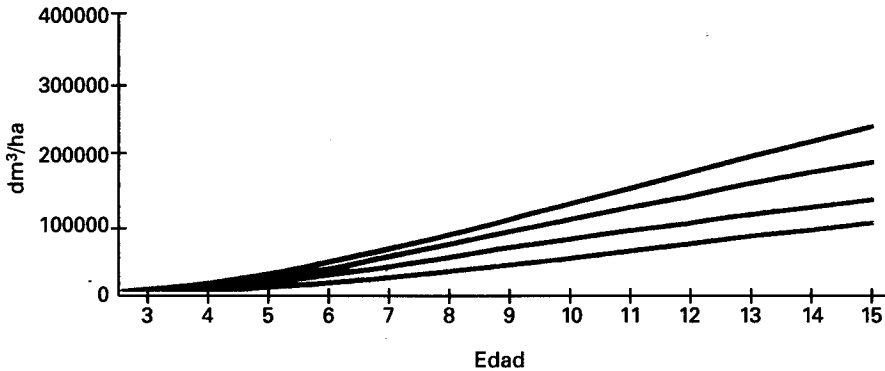


Fig. 3.- Producción estimada, por edad, en  $\text{dm}^3/\text{ha}$  utilizando los modelos de Korf para masas de *Populus x euramericana* en la Cuenca del Duero  
Yield estimated by age, in  $\text{dm}^3/\text{ha}$  using the Korf model for *Populus x euramericana* in the Duero basin

estadístico Covratio detecta observaciones atípicas en los tratamientos 00F1 y en el LAF2; el estadístico Dfbetas detecta pocas observaciones influyentes pero cabe resaltar que éstas se concentran en la edad tres años para la variable independiente SI y el tratamiento 00F1 para la variable independiente  $t^{-1}$ . La figura de residuos frente a los valores predichos y el de residuos frente a la variable independiente SI no denotan ninguna alteración en las hipótesis básicas del modelo general de regresión, sin embargo la figura de residuos frente a la variable independiente  $t^{-1}$  muestra una cierta heterocedasticidad que afecta a los intervalos de confianza del modelo y no a la predicción de los parámetros, por lo que el modelo de Clutter-Schumacher se considera el adecuado para nuestro trabajo pues al tratarse de un modelo que se piensa aplicar fuera del rango de construcción del mismo no se pretende calcular los intervalos de confianza.

El análisis de los residuos muestra que el cuadrado medio del error (CME) del modelo es igual a 0,03962, sensiblemente menor que la varianza de los residuos (0,177). El test de Shapiro-Wilk indica que no existen motivos para pensar que los residuos no son normales ( $W=0,908$  y  $\text{Prob} < 0,192$ ), el valor de Skewness (1,111) nos conduce a suponer que la falta de normalidad, si es que existe, se debe a que no se dispone de un número suficiente de datos y no a un problema intrínseco a los residuos. Aceptando lo anterior y como la media de los residuos (0,345) es ligeramente superior a cero podemos deducir que el modelo linealizado infraestima ligeramente las producciones por lo que se trata desde ese punto de vista de un modelo conservador.

## CONCLUSIONES

Como ya se expuso en la introducción el objetivo de este trabajo es obtener un modelo de producción aplicable a las masas de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214" con un marco de plantación de 6 x 6 metros en la Cuenca del Duero, a partir de los datos disponibles que provienen de parcelas de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador" con un marco de plantación de 8 x 5 metros.

El primer paso para la construcción de un modelo de este tipo, si se toma como estrategia de modelización la determinística, es estudiar las calidades de las masas. Para el ajuste de la curva guía, los dos modelos biológicos linealizados, en todas sus variantes, presentan un alto coeficiente de determinación; los valores extremos lo presentan el modelo de Chapman-Richards con  $R^2=0.6322$  si el parámetro  $b$  es igual a 1, y  $R^2=0.8978$  si toma el valor 0.15 el parámetro  $b$ . El número de calidades elegido, 4, y la edad típica tomada, 10 años, es un compromiso entre los tres criterios adoptados y una clasificación que sea útil en la práctica selvícola. La solución de tres calidades y edad típica 10 años aunque es mejor no se ha elegido por considerar que distinguir sólo entre choperas buenas, malas y regulares aporta poco a la populicultura práctica. Es importante destacar que para el estudio de calidades en las masas de *Populus x euramericana* en la Cuenca del Duero deben evitarse las edades de 3, 5 y 6 años pues se han detectado problemas al discriminar entre la II y la III calidad (a los 3 años), entre la I y la II (a los 5 años y el modelo en su forma lineal) y entre la II y la III, y la III y la IV (a los 6 años). Dos buenos momentos para determinar la calidad de las choperas es a los 4 y a los 7 años pues todavía se está a tiempo de reaccionar, mediante una intervención como abonado, laboreo o riego, si la calidad no es tan buena como se podría esperar.

Los modelos de producción estudiados se han dividido entre los que no utilizan el SI como variable independiente y los que sí lo utilizan. Entre los primeros el modelo de Korf, variando el parámetro  $c$ , se ha destacado como el que mayor coeficiente de determinación presenta en todas las calidades. Sin embargo se ha elegido el modelo de Clutter-Schumacher, que tiene el SI como variable independiente, por ser la solución más sencilla y que aporta mayor consistencia biológica en sus predicciones; los valores de producción y crecimiento medio a las diferentes edades y del turno de máxima renta en especie, utilizando el modelo de Clutter-Schumacher, está de acuerdo con las experiencias previas en cuanto a selvicultura de estas masas forestales.

La evaluación del modelo de Clutter-Schumacher fuera del rango de construcción, concretamente para choperas de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214" con un marco de plantación de 6 x 6 metros, en lugar de masas de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador" y un marco de plantación de 8 x 5 metros, es sólo provisional debido a la escasez de datos disponibles para la misma. La experiencia confirma la similitud de los clones 'Campeador' e 'I-214', así como que el espaciamiento 8 x 5 metros no supera las producciones del espaciamiento 6 x 6 metros, comúnmente aceptado como el mejor en la Cuenca del Duero. Aunque



en esta primera aproximación se ha dado por válido el modelo con la salvedad de que infraestima las producciones, lo cual sin duda es positivo, se debe tener en cuenta que los residuos que sobre el modelo transformado (mediante logaritmos naturales) son aditivos, se vuelven multiplicativos al deshacer la transformación del modelo.

La apariencia de exactitud, si es que esta palabra tiene algún sentido en estadística, de los modelos determinísticos pueden conducir a conclusiones erróneas; Prigogine (1993) refiriéndose a la mecánica cuántica enuncia que 'en la concepción clásica el determinismo era fundamental, y la probabilidad una aproximación a la descripción determinista, debida a nuestra información imperfecta. Hoy la situación es la inversa: las estructuras de la naturaleza nos costrañen a introducir la probabilidad independientemente de la información que poseamos. La descripción determinista no se aplica de hecho más que a situaciones sencillas, idealizadas, que no son representativas de la realidad física que nos rodea'. Estas palabras son plenamente aplicables a los sistemas biológicos en general y a las masas forestales en particular. Debemos tener en cuenta que este modelo, como todos los determinísticos, no son sino una aproximación a las condiciones medias de la realidad biológica y no puede tomarse nada más que como una orientación para la gestión de las masas *Populus x euramericana* en la Cuenca del Duero. Pese a lo anterior los modelos determinísticos, por su facilidad de construcción y validez contrastada por el uso, tienen asegurado un lugar de privilegio en la selvicultura de los próximos decenios.

## SUMMARY

### Analyse of yield models for *Populus x euramericana* in the Duero basin

With data from a experience on cultural treatments in stands of *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador" (8 x 5 m planted), a yield and growth model for the Duero basin (Northern Spain) has been developed. In order to select the best model, the determination coefficient, variance coefficient and biological consistence of predictions have been employed. The model selected has been the Clutter-Schumacher model, modified because of the high correlation between density and age in this stand type. This model has been validated from data of *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "I-214" (6 x 6 m planted).

**KEY WORDS:** Model  
Yield  
Growth  
Poplar stands  
Duero basin  
Spain  
*Populus x euramericana*

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALDER D., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del crecimiento. Vol. 2 Predicción del rendimiento. FAO, Roma, 80 pp.
- ALLUE J.L., 1990. Atlas fitoclimático de España. Taxonomías. INIA-MAPA, Madrid, 221 pp+10 mapas.
- ASSMANN E., 1970. The principles of forest yield study. Pergamon Press Ltd., Oxford. 506 pp.
- BELSLEY D.A., KUH E., WELSCH R.E., 1980. Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity. Wiley, New York
- BENGOA J., 1992. Calidad de estación en rebollares de La Rioja: alternativas al índice de sitio. Actas del Congreso Forestal Español T. II:473-478
- CARMEAN W.H., HANN J.T., JACOBS R.D., 1989. Site index curves for forest tree species in the eastern United States. USDA, 142 pp.
- CASTILLO M.T., PADRO A., 1987. Short note: Electrophoretic characterization of euramerican poplar clones 'I-214' and 'Campeador' *Silvae Genetica* 36(5-6):250-251
- CLUTTER J.L., 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *Forest Science* 9:354-371
- FRANC A., CURT T., 1990. Etude des relations stations-production pour le sapin pectine dans les Hautes Cevennes (Lozere), 30 pp.
- GONZALEZ ANTOÑANZAS F., 1983. Aumento de la producción en las choperas. Resultados de doce años de un estudio comparativo de técnicas selvícolas. Comunicaciones INIA. Serie: Recursos Naturales, nº 17, Madrid, 38 pp.
- GONZALEZ ANTOÑANZAS F., 1986. Crecimiento y producción, en la meseta central, según calidades de estación, de plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier "Campeador". Comunicaciones INIA Serie: Recursos Naturales, nº44, Madrid. 60 pp.
- GONZALEZ ANTOÑANZAS F., DOMINGO P., 1987. Primeros resultados obtenidos en la comparación de clones de chopo en los Populetum del INIA en la meseta central. Comunicaciones INIA. Serie: Recursos Naturales, nº45, 51 pp.
- GRAU J.M., GONZALEZ ANTOÑANZAS F., 1992. Fertilización, in PADRO, A. (Ed.) Act. de la 1ª Sesión de la Comisión Internacional del Alamo, pp 55-76
- HALL F.C., 1983. Growth basal area: a field method for appraising forest site potential for stockability. *Canadian Journal of Forest Research*, 13:70-77
- MADRIGAL A., PUERTAS F., MARTINEZ MILLAN J., 1992. Tablas de producción para *Fagus sylvatica* L. en Navarra. Gob. de Navarra, Pamplona, 122 pp.
- MENDOZA G.A., GUMPAL E.C., 1987. Growth projection of a selectively cut-over forest based on residual inventory. *Forest Ecology and Management*, 20:253-263.
- NICOLAS A., SANCHEZ-PALOMARES O., 1970. Análisis e informe de 16 muestras de tierra. Archivos del Departamento de Silvopascicultura y Ordenación Forestal del INIA. Madrid. (Datos no publicados).
- ORTEGA A., MONTERO G., 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica *Ecología*, 2:155-184
- PADRO A., 1982. Curvas de productividad del clon 'I-214' en regadío con planta R<sup>2</sup>T<sup>2</sup> y marco 6 x 6 m en el valle medio del Ebro. *Anales del INIA. Serie Forestal*, 6:63-73
- PADRO A., 1992. Clones de chopo para el valle medio del Ebro. Diputación General de Aragón. Servicio de Investigación Agraria. Zaragoza.
- PEÑA D., 1994. Estadística. Modelos y métodos. Vol. 2 Modelos lineales y series temporales. Alianza Editorial, Madrid, 745 pp
- PITA P.A., 1966. Clasificación provisional de las calidades de la estación en las masas de pino piñonero. *Anales del IFIE*, 171-182
- PRIGOGINE I., 1993. El nacimiento del tiempo. Ed. Tusquets Barcelona. 98 pp
- RAWLINGS J.O., 1988. Applied regression analysis. A research tool. Wadsworth and Brooks/Cole, Belmont., 553 pp.
- RODRIGUEZ SOALLEIRO R.J., ALVAREZ GONZALEZ J.G., VEGA G., TOVAL G., RUIZ ZORRILLA P., 1993. Revisión de las curvas de calidad de estación de pinus pinaster Ait. en Galicia. Actas del Congreso Forestal Español T. II:587-592
- ROJO A., MONTERO G., 1994. Tablas de producción españolas. *Montes* 38:35-42
- SAN MIGUEL, A., 1986. Ecología, tipología, valoración y alternativas silvopascícolas de los quejiga-

- res (*Quercus faginea* Lamk.) de Guadalajara. Ed. MAPA-INIA. Madrid.
- SCHUMACHER F.X., 1939. A new growth curve and its application to timber yield studies. J. For. 37:819-820
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INC., 1985. SAS User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, 1290+956 pp.
- VANCLAY J., 1994. Modelling forest growth and yield. Application to mixed tropical forest. CAB International 312 pp.
- WORREL W.H., MALCOM D.C., 1990a. Productivity of Sitka Spruce in Northern Britain (the effects of elevation and climate) Forestry 63(2):105-118
- WORREL W.H., MALCOM D.C., 1990b. Productivity of Sitka Spruce in Northern Britain (Prediction from site factors) Forestry 63(2):119-128
- ZEIDE B., 1993. Analysis of growth equations. Forest Science 39(3):594-616