



Foto 1.- Gestión sostenible en masas de pino radiata

Francisco Rodríguez Puerta* y Julio Rodríguez Puerta**

*Universidad de Lerida. Departamento de Ingeniería Agroforestal. (frodriguezp@teleline.es)

**Universidad Carlos III de Madrid. Dpto. de Estadística y Econometría. (puerta@est-econ.uc3m.es)

MATDENDRO v1.0: PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE EXISTENCIAS CON CLASIFICACIÓN DE PRODUCTOS

RESUMEN

En este trabajo se presenta una aplicación informática (MatDendro v1.0) para el cálculo de existencias y posterior clasificación de la madera en rollo, abordando el problema mediante el análisis del modelo del perfil del árbol, combinado con el modelo de crecimiento en altura y en diámetro. El volumen de los distintos productos se obtiene mediante integración numérica de dichos modelos. Los datos de entrada del programa son los correspondientes a los de un inventario forestal, de la zona y especie para la que se hayan ajustado previamente los distintos modelos

Palabras clave: modelización, existencias, herramientas de gestión, perfil del árbol, métodos numéricos.

I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las existencias de una masa forestal es imprescindible para su posterior gestión, por lo que resulta interesante contar con una herramienta sencilla y eficaz que proporcione dicha estimación.

Para el cálculo de las existencias de una masa forestal se suelen utilizar tarifas de cubicación. Estas tarifas constituyen modelos estructurales que resumen la relación entre la altura y el volumen del árbol. Estas tarifas tienen un carácter local y su precisión está muy condicionada al tamaño de la muestra elegida, dado que el volumen de cada árbol corresponde a una única observación. La obtención de este tipo de tarifas resulta muy costosa (en número de árboles y observaciones realizadas sobre cada uno) y no tienen en cuenta, al resumir toda la información del árbol en un escalar (volumen del árbol), las características invariantes asociadas a cada especie analizada (rasgos morfológicos comunes en la especie).

En las dos últimas décadas se observa un interés creciente entre los distintos centros de investigación por abordar el análisis dase-dendrométrico de una masa forestal mediante el uso de modelos del perfil del árbol. Este auge de las técnicas de modelización en el ámbito forestal surge de la necesidad de reducir las unidades muestrales (árboles) pero sin que esto conlleve una pérdida en la precisión obtenida. Además estas técnicas permiten la reconstrucción por ordenador de los árboles para su posterior análisis (clasificación de los productos obtenidos tras un despiece, evolución de su crecimiento, simulación de distintos tratamientos selvícolas, etc.).

Con este objetivo, instituciones como el INRA (*Institute Nationale des Recherches Agronomiques*) en Francia o el NZ-FRI (*New Zealand Forest Research Institut*) en Nueva Zelanda han desarrollado herramientas informáticas, basadas tanto en modelos de crecimiento como de evaluación de la calidad de la madera, como son *WinEpiñ* y *WoodPro* respectivamente. Estos programas han sabido aunar sencillez

de uso y una alta precisión en los resultados obtenidos, como se muestra en el análisis con datos reales de LEBAN (1995). Esto se debe a la constante actualización, en estos programas, de las mejoras que han ido apareciendo en la literatura en el campo de la modelización forestal. La limitación que presentan estos programas es consecuencia del marcado carácter especie-región que presentan las masas forestales, lo que los hace solamente aplicables a las especies y regiones modelizadas. De aquí surge la necesidad de profundizar en las técnicas de modelización y en la creación de herramientas que resulten operativas para la gestión de las masas forestales españolas.

Como resultado del uso de estas técnicas de modelización para el cálculo de existencias, se ha creado la aplicación informática (*MatDendro v1.0*) capaz de calcular las existencias y posterior clasificación de la madera en rollo a partir de los datos de un inventario forestal, basándose en un modelo del perfil del árbol y un modelo de crecimiento medio, tanto en diámetro como en altura.

La estructura del artículo es la siguiente: el segundo apartado presenta una descripción sucinta de los modelos empleados, así como una breve descripción del experimento para la obtención de los parámetros de dichos modelos; en el tercer apartado se presenta la versión 1.0 del programa *MatDendro* implementado en *MatLab*, detallando en las subapartados las distintas opciones de análisis que permite el programa.

II. METODOLOGÍA Y MODELOS

Previa a la descripción de los modelos usados en el programa *MatDendro*, describiremos el experimento y la recogida de datos, efectuada en el macizo del Montseny, con la que posteriormente se estimaron todos los parámetros que aparecen en los distintos modelos que se describen en esta sección. Esto introduce una restricción en el uso del programa, puesto que los modelos están ajustados sólo para pino radiata de esta región, pero de igual forma que es necesario el uso

de tarifas de cubicación de cada zona y para cada especie, mediante modelos es necesario la recogida de datos para una pequeña muestra de árboles y así ajustar el modelo para cada pareja especie-región. Una de las ventajas que presenta abordar el problema de las existencias mediante modelos del perfil del árbol es que de cada árbol se obtienen muchas observaciones (medidas del diámetro a distintas alturas respecto al suelo) mientras que para la elaboración de tarifas de cubicación, cada árbol representa una sola observación. Este análisis exhaustivo de cada árbol permite disminuir el número de árboles necesarios puesto que se estudia el patrón que rige la forma del árbol para una especie y región dadas. En la estimación posterior de los parámetros se debe prestar especial atención para no sobreajustar los modelos a la muestra obtenida realizando validaciones cruzadas de los resultados (reservar algunos árboles de la muestra para la validación del modelo).

Se estudiaron 6 árboles completos del estrato dominante, todos ellos de la misma edad y procedentes de la misma masa, en el macizo del Montseny (Barcelona). La metodología para el análisis de los fustes utilizada fue la propuesta por la UMR (Unité Mixte de Recherches INRA-ENGREF), obteniéndose un total de 330 observaciones de diámetros medios (media del diámetro máximo y mínimo en cada uno de los verticilos de los 6 árboles). Se midió también la altura total de cada árbol (una vez apeado), el número de unidades verticales e interverticales (dado que el pino radiata presenta policiclismo) y su posición respecto al suelo, el número de ramas verticales e interverticales y el diámetro medio de las mismas. Finalmente se cortaron en cada árbol tantos discos, de entre 2 y 4 cm de espesor, como verticilos presentaba el árbol, en los cuales se referenció su altura respecto al suelo y se analizó la anchura de los anillos en cada uno de estos discos, así como el espesor de la corteza a lo largo de su perímetro.

Estos fueron los datos que se utilizaron para determinar los parámetros de los modelos del perfil del

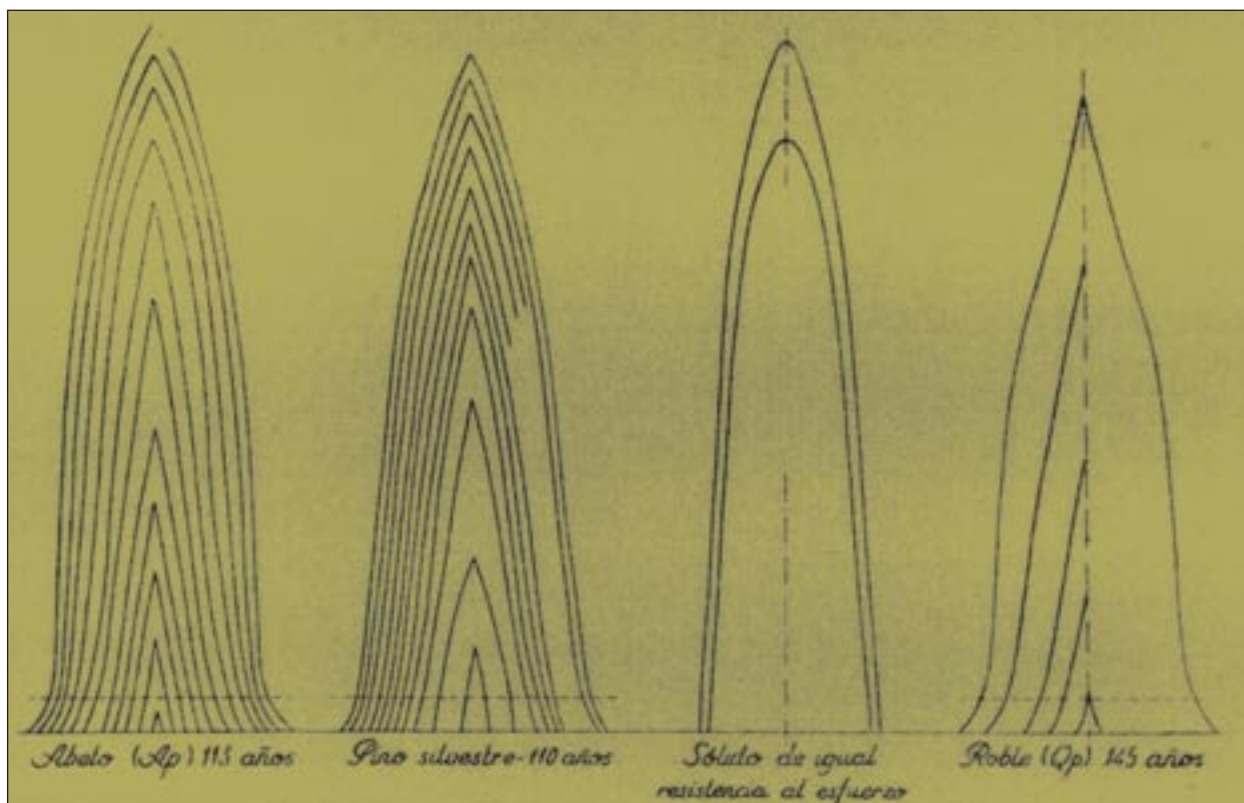


Gráfico 1.- Evolución del perfil del árbol para distintas especies forestal según MACKAY (1961)

árbol con y sin corteza y de los de crecimiento en diámetro y en altura. El ajuste de todos estos modelos se realizó con el procedimiento PROC NLIN de SAS/STAT versión 6.12 (SAS Inst.,1987).

1. Modelo del perfil del árbol

El perfil del árbol viene a ser su silueta o proyección ortogonal sobre un plano paralelo al eje. Encontrando su expresión analítica $r(x)$, donde x es la altura, y suponiendo simetría cilíndrica se deduce de ella la ley funcional del área de una sección del árbol para toda altura x , $S(x) = \pi \cdot r^2(x)$, e integrando la del volumen como función de su altura.

En la actualidad existen dos tipos de familias de modelos para describir el perfil del árbol: modelos integrados y modelos funcionales (SAINT-ANDRÉ et al 1999):

- *modelos integrados* o ecuaciones del perfil del árbol que dan directamente el diámetro del tronco en función de la altura a

la que se desea predecir, y

- *modelos funcionales* que estiman el perfil vertical de cada anillo (su superficie o su anchura) y por superposición, permiten obtener el perfil del árbol.

Los modelos integrados son los más empleados y sus ecuaciones pueden clasificarse en tres grupos:

- las *funciones simples* de conicidad que pueden ser ecuaciones hiperbólicas, trigonométricas o sigmoides
- las *funciones por partes* que utilizan un conjunto de polinomios
- las *funciones con exponente variable* que estiman el perfil del árbol con la ayuda de un coeficiente de forma que va variando a lo largo del árbol.

Entre estos modelos, se ha optado por un modelo integrado con exponente variable propuesto por DAQUITAINE et al. (1999) inspirado en el modelo de Newnham (1992) cuya ecuación simplificada es del tipo: $d_{hr} = u \cdot hr^q$, donde d_{hr}

es el diámetro del tronco a la altura relativa hr dada ($hr = z/ht$ donde ht es la altura total del árbol y z la altura a la que nos situamos), u es una constante que depende del diámetro normal y q es el coeficiente local de forma o coeficiente mórfico local. La idea de este modelo es hacer variar el coeficiente q a lo largo del tronco en función de la altura relativa y a su vez que este coeficiente dependa de las características dendrométricas (altura total y diámetro normal), para así conseguir captar las variaciones en el perfil del árbol de los distintos tipos dendrométricos, en función de la altura relativa a la que nos situemos. Una ventaja adicional es que la transición entre los distintos tipos dendrométricos se realiza de forma suave (diferenciable), lo cual resulta más realista además de aportar ventajas en el tratamiento analítico de estos modelos.

Este modelo, llamado STUD (Apéndice A), ha sido realizado en el seno de la UMR, y supone una evolución respecto al antiguo modelo Forest, realizado por esta mis-

25	2180	39	2.6	56
25	2725	44.3	2.16	56
25	2870	41.2	2.12	56
25	2955	45.1	2.85	56
25	2855	41	1.96	56
25	2715	42	2.2	56

Figura 1.- Formato de introducción de datos

MatDendro	
Arbol	Ctrl+B
Población	Ctrl+P
Opciones	Ctrl+O
Salir	Ctrl+S

Figura 3.- Distintos análisis del programa

Archivo de datos: C:\mafab\bin\datos2.txt

Superficie muestreada (Ha): 1

Número de árboles tipo: 3

Tamaño de la toza (cm): 250

Diámetro a la altura de sierra (cm): 20

Diámetro a la altura de fuste (cm): 7

Área Basimétrica V. comercial
 Pies por Hectares V. sierra
 D. medio y Dg V. titulación
 H. medio y Ho V. corteza
 Esbeltez media Clasificación tozas
 Esbeltez dominante Conicidad
 Hart-Becking Volumen tozas
 Existencia Troza media

Aceptar

Figura 2.- Opciones del programa

Así, para el cálculo del volumen de la madera de sierra se integra entre la altura del tocón (20 cm por defecto) y la altura en la que el diámetro es 20 cm. Un inconveniente de este tipo de modelos es la imposibilidad de integración analítica, por lo que hay que recurrir a herramientas numéricas para su integración aproximada. Es-

tudios desarrollados por el equipo de investigación del UMR muestran la robustez de este modelo, no sólo para las distintas áreas de una especie, sino para distintas especies (Picea, Douglas, Pino laricio, etc.).

2. Modelos de crecimiento

Independientemente del sistema de cuantificación empleado para la medida del crecimiento (longitud, diámetro o área), se obtiene una curva denominada *sigmoide*, de Sachs o gran curva de crecimiento. Han sido propuestas diferentes formulaciones matemáticas para esta curva sigmoide. CALVO et al. (1994) presentan las cuatro formu-

ma unidad del INRA de Champenoux. Es una ecuación no lineal dependiente de 5 parámetros, en la que los dos primeros hacen referencia al perfil por encima de 130 cm y los tres restantes hacen referencia al raigal del árbol. Suponiendo simetría cilíndrica (ausencia de elipticidad) se deduce de este modelo la ley funcional del área de una sección del árbol para toda altura z , $S(z) = \pi \cdot r^2(z)$, e integrando dicha ley se obtiene el volumen del árbol en el intervalo considerado (z_1-z_2).

$$V(z) = \int_{z_1}^{z_2} S(z) dz$$

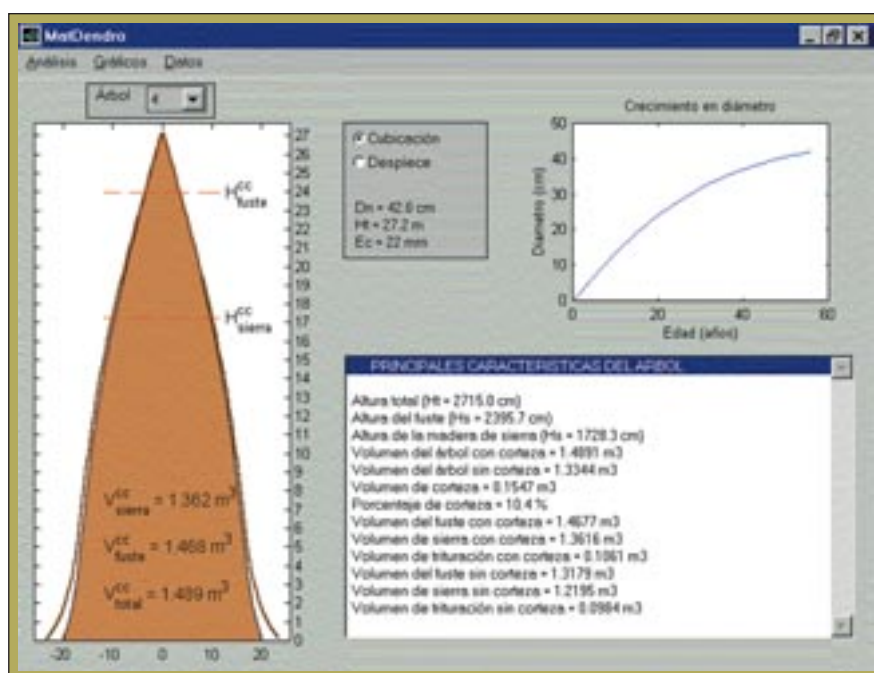


Figura 4a.- Cubicación del Análisis Árbol



Figura 2.- Ejemplo de aprovechamientos forestal

laciones más utilizadas en los ámbitos agronómico, ganadero y forestal: el modelo logístico, el de Gompertz, el de Richards y el de Weibull. Los tres primeros modelos se caracterizan por tener un punto de inflexión y dos asíntotas, una superior y otra inferior. Sin embargo, sólo el modelo Weibull tiene tres características que nos parecen interesantes, pasa por el origen, tiene una única asíntota y su intervalo de definición es de cero a infinito. Por tanto, de las cuatro formulaciones recomendadas, se optó por el modelo Weibull, cuya expresión funcional se presenta en el Apéndice B. Mediante el modelo de crecimiento en altura, es posible conocer donde se sitúan los verticilos del árbol, para así conocer donde se sitúan las ramas, para luego realizar la clasificación de la madera en rollo. Con la combinación de los dos modelos de crecimiento y el del perfil del árbol es posible reconstruir a posteriori el crecimiento de árbol y evaluar su volumen a lo largo del tiempo.

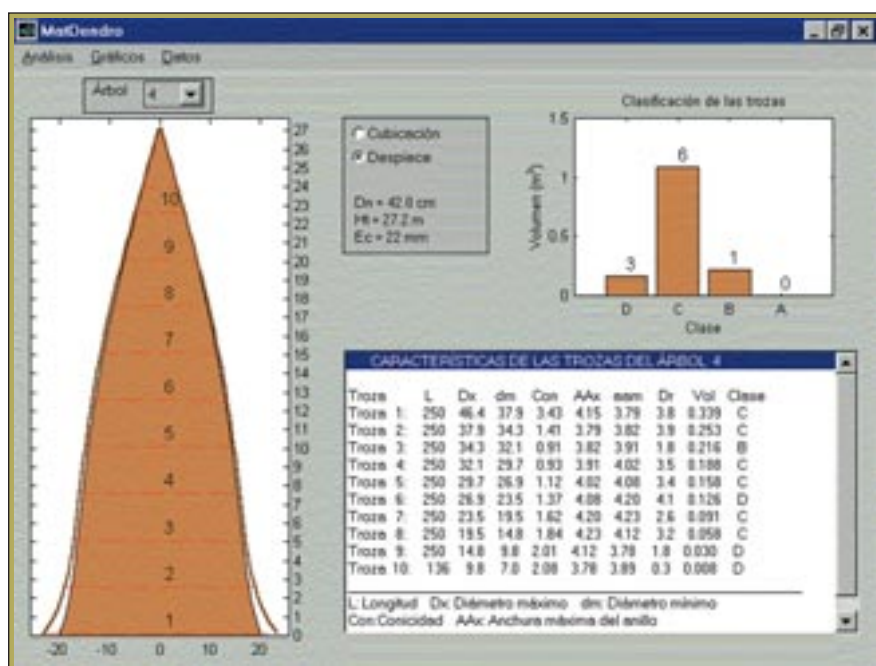


Figura 4b.- Despiece del análisis árbol

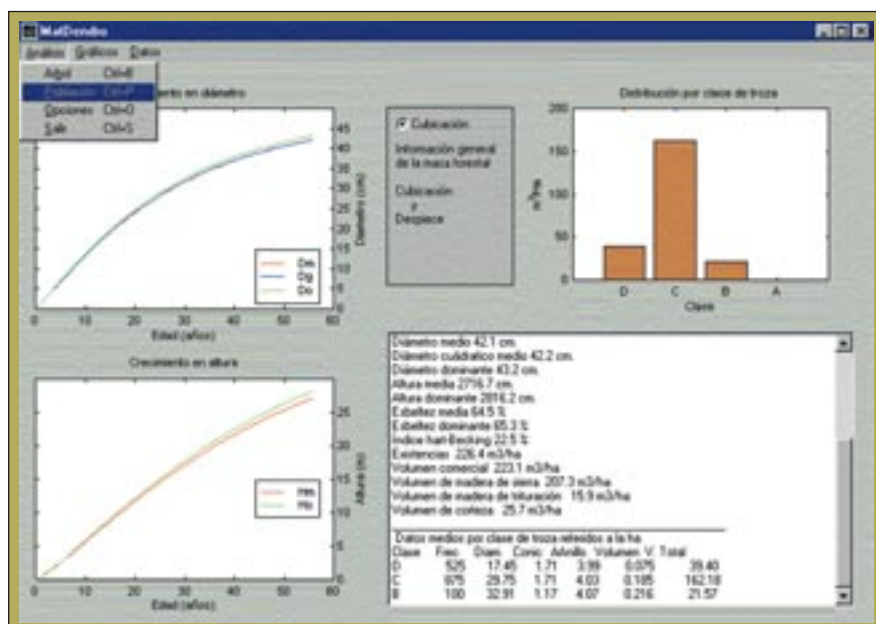


Figura 5.- Análisis población

III. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA MatDendro

Este programa permite dos tipos de análisis de la masa forestal:

- El primer análisis, dendrométrico, referenciado en el programa bajo el epígrafe «Árbol» presenta las distintas características en cuanto a cubicación y despiece del árbol basándose en el modelo de STUD del perfil de árbol con y sin corteza.

- El segundo análisis, dasométrico, bajo el epígrafe «Población» presenta las principales estimaciones dasométricas de una masa forestal, que se realizan a partir de los datos de un inventario.

El programa ha sido desarrollado en MatLab (*Matrix Laboratory*) por ser éste un entorno especialmente adecuado para el cálculo numérico y el manejo de álgebra lineal (cálculo matricial). MatDendro v1.0 ha sido implementado en MatLab v5.2 lo que implica unas restricciones de uso, ya que para su ejecución es necesario disponer de una versión de MatLab 5.2 o posterior. Para paliar esta limitación, en la actualidad se está desarrollando una nueva versión implementada en Visual Basic.

A. Formato de Introducción de los datos del inventario

El programa lee un fichero en formato ASCII que tiene extensión «.txt» donde por filas se introducen, separadas por tabulaciones, para cada árbol tipo o clase diamétrica las características observadas en la Figura 1.

- Frecuencia (uno en árboles tipo).
- Altura del árbol (en cm).
- Diámetro normal del árbol o clase diamétrica (en cm).
- Espesor de la corteza a la altura del pecho (en cm).
- Edad (en años).

La elección del formato *.txt es debida a la disponibilidad de programas como EXCEL, DBASE, ACCESS, etc. para generarlos.

B. Pantalla «Opciones del Programa»

Esta pantalla aparece tanto la primera vez que nos introducimos en el programa MatDendro, como siempre que se seleccione dentro del menú «Análisis». La información se visualiza en dos marcos. En el marco superior aparecen las opciones para el análisis de la muestra y en el inferior las características tanto dasométricas como de despiece de la muestra a analizar (Figura 2).

Las primeras opciones que aparecen son las siguientes:

- Archivo de Datos: nombre y ruta del archivo de inventario *.txt.
- Superficie muestreada, siendo ésta la superficie total o parcial de las parcelas analizadas.
- Número de árboles tipo o clases diamétricas del inventario,
- Longitud de las trozas que deseamos despiezar.
- Diámetro mínimo de la madera destinada a la industria del aserrío (20 cm. por defecto).
- Diámetro en punta delgada o diámetro aprovechable (7 cm. por defecto).

El segundo grupo de opciones corresponde a los índices más utilizados para describir el estado de una masa forestal: Area Basimétrica, Distribución de pies por hectárea, Diámetro medio (Dm) y diámetro cuadrático medio (Dg), Altura media (Hm) y altura dominante (Ho), Esbeltez media y dominante, Índice de Hart-Becking, Existencias y los distintos volúmenes de sierra y trituración.

También se incorporan unos parámetros que hacen referencia al despiece de los árboles en sus respectivas trozas como son: Clasificación de las trozas según la norma simplificada francesa del CTBA (Apéndice III), Conicidad media para cada clase de trozas, Volúmenes de las trozas por clases y Descripción general de la troza media de cada clase.

C. Pantalla MatDendro

Esta pantalla es el entorno donde aparecerán los distintos resultados obtenidos tanto para la opción «Árbol» como «Población» del menú de «Análisis» (Figura 3).

1. Análisis/Árbol

Esta pantalla está subdividida en tres ventanas (dos gráficas y una de texto). Y a su vez tiene dos opciones posibles: «Cubicación» y «Despiece». En la opción de «Cubicación» la organización de figuras es la que podemos observar en la Figura 4a.

En la pantalla gráfica situada a la izquierda, aparece el perfil del árbol donde el modelo sin corteza está sombreado. En este croquis aparecen diferentes informaciones como la altura del fuste y sierra y sus respectivos volúmenes para el modelo con corteza. En la parte superior se haya el menú desplegable «Árbol» donde se selecciona la clase diamétrica o árbol tipo del que queremos obtener información.

Las características inventariables de este árbol aparecerán en el marco de la derecha de la pantalla bajo los botones «Cubicación» y «Despiece».

En una pantalla de texto situada en la parte inferior derecha se muestran algunas de las características señaladas en el menú «Opciones».

Finalmente, sobre esta pantalla de texto observamos la curva de crecimiento en diámetro para este árbol.

Seleccionando la opción «Despiece» aparece la pantalla que podemos observar en la Figura 4b.

Sobre el croquis del árbol se muestra el despiece en trozas de la longitud seleccionada en el menú «Opciones». En la pantalla de texto, situada en la parte derecha inferior aparecen las principales características de cada troza: Longitud (L), Diámetro máximo, en la base (Dx) y mínimo, en la testa (dm), Conicidad (Con), Anchura del anillo máxima (Aax) y mínima (aam), Diámetro medio de las ramas (Dr), Volumen (Vol) y finalmente su Clasificación (A, B, C o D) según la norma francesa del CTBA.

Finalmente, sobre esta pantalla se ve un diagrama de barras de la clasificación de las trozas en cada una de las clases con la frecuencia absoluta de las mismas sobre cada una de las barras, representando el tamaño de la barra el volumen total de cada una de las clases.

2. Análisis/Población

Esta pantalla está subdividida en 4 ventanas, 3 de ellas gráficas y una de texto (Figura 5).

A la izquierda, nos encontramos con dos pantallas gráficas que simulan el crecimiento de la masa.

En la parte superior, se presenta la curva de crecimiento en diámetro, representadas por las curvas de crecimiento en diámetro medio (Dm) en diámetro dominante (Do) y en diámetro medio cuadrático (Dg). En la parte inferior, se presenta el crecimiento en altura de la masa, representado por las curvas de crecimiento en altura media (Hm) y en altura dominante (Ho).

En la parte derecha de la pantalla, nos encontramos en su parte superior con un diagrama de barras en el que se representa la frecuencia de cada una de las clases de trozas clasificadas según la norma francesa, representando el tamaño de la barra en volumen por hectárea de cada clase.

Finalmente, en la parte inferior derecha, nos encontramos con un cuadro de texto dividido en dos partes; una primera parte referida al estado de la masa y una segunda parte referida al despiece de las trozas de todos los árboles que tenemos por hectárea. En la primera parte del cuadro de texto se obtienen los principales parámetros, que hemos seleccionado en el menú «Opciones», que describen el estado de una masa tras realizar un inventario (Área Basimétrica, índice Hart-Becking, etc...). En la segunda parte del cuadro de texto, obtenemos el volumen de cada clase de trozas por hectárea, su frecuencia, su conicidad media, etc.

IV. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Jean-Michel Leban, Gerard Nepveu y Renaud Daquitaine de la UMR del INRA de Champenoux, a Miguel Broto del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Lerida y a Josep Argemí del Área de Parques Naturales de la Diputación de Barcelona, por la asistencia en las diferentes labores científicas realizadas. ■

V. BIBLIOGRAFÍA

CALVO, R.M. & GONZÁLEZ J.L. & PÉREZ, S.; 1994. *Manual de mode-*

los no lineales en los ámbitos agronómico, ganadero y forestal. M.A.P.A., Madrid.

DAQUITAINE, R. & SAINT-ANDRÉ, L. & LEBAN, J.M.; 1999. *Product properties prediction - improved utilisation in the forestry-wood chain applied on spruce sawnwood: Modelling stem properties distribution.* Final Report sub-task A2.1. Nancy. (Documento interno,INRA)

HOULLIER, F. & LEBAN, J.M.; 1991. *Modèle théorique de croissance des arbres en peuplement équienne et monospécifique.* Nancy. (Documento interno INRA)

LEBAN, J.M. & DAQUITAINE, R. & SAINT-ANDRÉ, L.; 1996. *Un outil d'évaluation de la qualité de la ressource en bois appliqué au Douglas: Le logiciel Win-Epifn.* Forêt Entreprise 109. 11-15 pp

LEBAN, J.M.; 1995. *Estimation des propriétés des sciages d'une ressource forestière: Application à l'épicéa commun (Picea abies Karst.)* Rev.For.Fr. XLVII 131-139 – n° Spécial. Nancy.

NEWNHAM, R.M.; 1992. *Variable-form taper functions for four Alberta species.* Canadian Journal of Forest Research. Vol 22. 210-223pp

SAINT-ANDRÉ, L. & LEBAN, J.M. & HOULLIER, F. & DAQUITAINE, R.; 1999. *Comparaison de deux modèles de profil de tige et validation sur un échantillon indépendant. Application à l'épicéa commun dans le nord-est de la France.* Annals Forest Sciences 56. 121-132 pp

TIAN, X. & COWN, D.J.; 1997. *Modelling of wood properties in New Zealand.* FRI-Bulletin No 201, 72-81.

SAINT-ANDRÉ, L.; 1994. *Modélisation de la croissance et de la qualité des bois de l'épicéa commun. Validation des modèles de recons-*

truction géométrique des troncs. Chamepoux-INRA. (Rapport final DEA Sciences du Bois)

SAINT-ANDRÉ, L. & LEBAN, J.M.; 1997. *WinEPiFN 3.2. Logiciel d'évaluation de la qualité de la ressource en bois.* Version PC bajo Windows95.

VI. APENDICES

A. Modelo del perfil del árbol

Modelo STUD

$$d(z, ht, d130) = \theta_5 d130 \left(1 - \frac{z}{ht}\right)^{k(z, ht, d130)} \left(1 + \theta_3 e^{-\theta_4 \frac{z}{ht}}\right)$$

$$k(z, ht, d130) = \theta_1 (ht, d130) + \theta_2 \left(1 - \frac{z}{ht}\right)$$

$$\theta_1 (ht, d130) = \theta_{1,0} + \theta_{1,1} \left(\frac{ht}{d130}\right)$$

Donde: *ht* es la altura total del árbol en cm, *d130* es el diámetro normal, en cm., *z* es la altura a la que se predice el diámetro en cm.

B. Modelo de crecimiento en altura y en diámetro

Modelo Weibull:

$$Y = K \left[1 - \exp(-ax^b)\right] \text{ con } b > 1, a > 0$$

siendo:

Y: Crecimiento en altura (crecimiento primario) en metros, o diámetro (crecimiento secundario) en cm, según el crecimiento que se estudie.

x: Edad, en años, a la que se predice el crecimiento.

C. Norma de clasificación de la madera en rollo

Norma francesa simplificada de clasificación de la madera en rollo

	A	B	C	D
Longitud (cm)	250	250	250	<250
Diámetro mínimo (cm)	40	25	14	<14
Conicidad respecto a Dx	5%	5%	>5%	>5%
Diámetro de las ramas (cm)	0	2.5	2.5	>2.5
Anchura del anillo (mm)	6	8	>8	>8