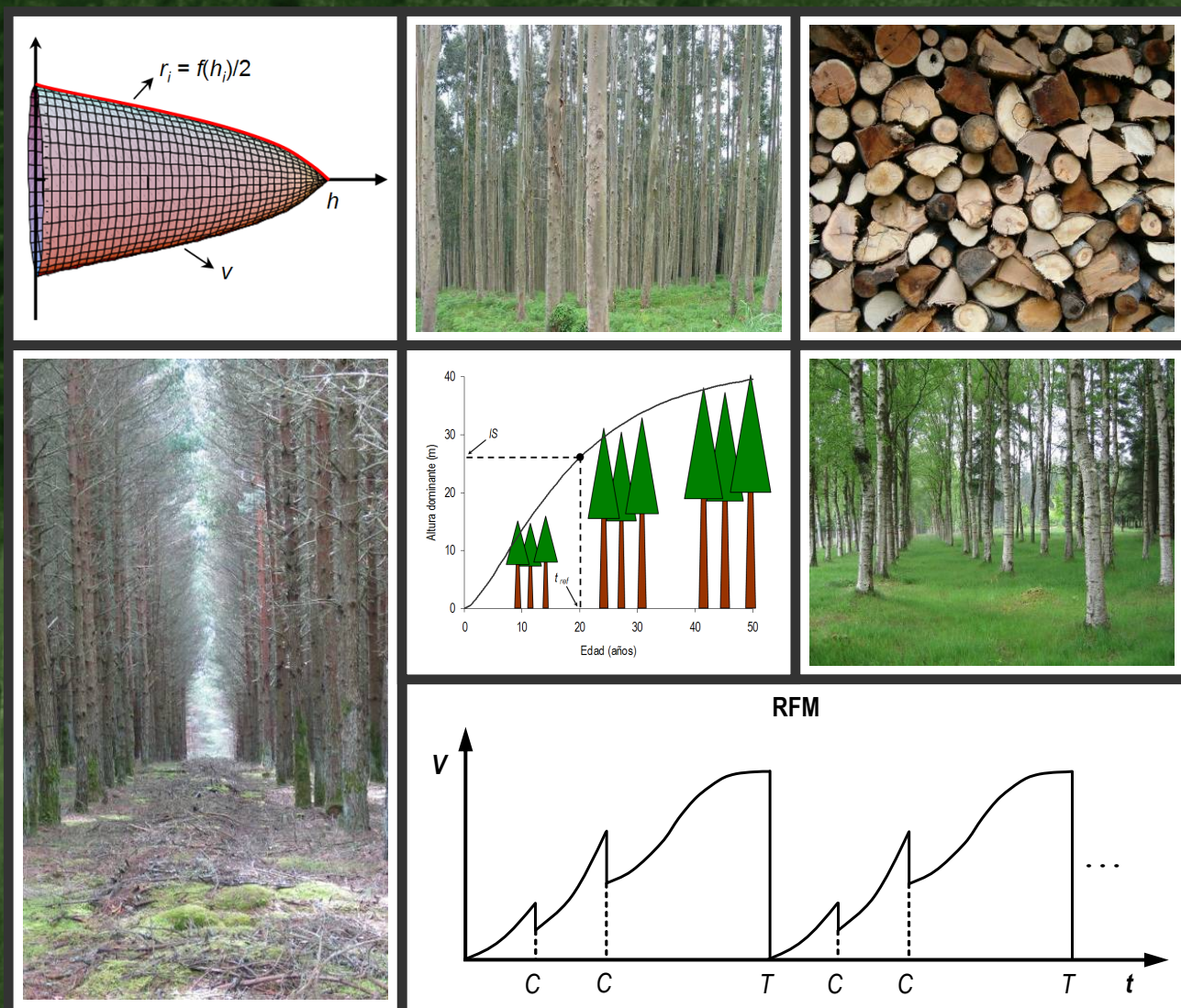


Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia



Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia

Ulises Diéguez-Aranda
Alberto Rojo Alboreca
Fernando Castedo-Dorado
Juan Gabriel Álvarez González
Marcos Barrio-Anta
Felipe Crecente-Campo
José Mario González González
César Pérez-Cruzado
Roque Rodríguez Soalleiro
Carlos Antonio López-Sánchez
Miguel Ángel Balboa-Murias
José Javier Gorgoso Varela
Federico Sánchez Rodríguez

Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFS)

<http://www.usc.es/uxfs>

Escuela Politécnica Superior
Universidad de Santiago de Compostela

Lugo, diciembre de 2009

Título Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia

Autores U. Diéguez-Aranda, A. Rojo Alboreca, F. Castedo-Dorado, J.G. Álvarez González, M. Barrio-Anta, F. Crecente-Campo, J.M. González González, C. Pérez-Cruzado, R. Rodríguez Soalleiro, C.A. López-Sánchez, M.Á. Balboa-Murias, J.J. Gorgoso Varela, F. Sánchez Rodríguez

Año 2009

Edita Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia

Imprime Tórculo Artes Gráficas, S.A.

ISBN 978-84-692-7395-1

Depósito Legal C 3638-2009

A nuestros maestros y amigos:

Alberto Madrigal Collazo
Francisco Javier Martínez Millán
Gregorio Montero González
Klaus von Gadow

Índice

Presentación.....	1
Contenido, estructura y uso de este libro.....	5
1. Introducción.....	9
1.1. Modelización forestal. Generalidades.....	9
1.1.1. <i>La planificación de la gestión forestal sostenible</i>	9
1.1.2. <i>Los modelos forestales de crecimiento</i>	11
1.1.3. <i>Clasificación de los modelos forestales de crecimiento</i>	13
1.2. La red de parcelas permanentes de experimentación forestal de la Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFS).....	18
1.2.1. <i>La red de parcelas permanentes de crecimiento</i>	22
1.2.2. <i>La red de sitios de ensayo de claras</i>	27
1.3. Modelos de crecimiento desarrollados para Galicia.....	33
1.4. Bibliografía.....	41
2. Calidad de estación.....	47
2.1. Introducción.....	47
2.1.1. <i>Concepto de estación forestal</i>	47
2.1.2. <i>Concepto de calidad de estación</i>	47
2.1.3. <i>Cómo evaluar la calidad de estación</i>	49
2.1.4. <i>Estimación de la calidad de estación basada en datos de altura del rodal. El índice de sitio y las curvas de calidad de estación</i>	50
2.1.5. <i>Fuentes de datos para elaborar curvas de índice de sitio</i>	52
2.1.6. <i>Definición de altura dominante y edad</i>	54
2.2. Material y métodos.....	55
2.2.1. <i>Datos</i>	56
2.2.2. <i>Modelos y metodologías de ajuste</i>	59
2.3. Resultados.....	61
2.4. Conclusiones y recomendaciones.....	67
2.5. Ejemplo de uso de las ecuaciones de calidad de estación.....	68
2.6. Bibliografía.....	73
3. Modelos estáticos de crecimiento y producción.....	77
3.1. Introducción.....	77
3.2. Tablas de producción.....	79
3.2.1. <i>Definición, concepto y utilidades</i>	79
3.2.2. <i>Clasificación de las tablas de producción</i>	80

3.2.3. Variables de las tablas de producción	82
3.2.4. Relaciones fundamentales.....	83
3.2.5. Datos	85
3.2.6. Metodología utilizada para elaborar las tablas de producción	86
3.2.7. Resultados	89
3.2.8. Ejemplo de utilización de las tablas de producción.....	99
3.3. Diagramas de manejo de la densidad	104
3.3.1. Definición, concepto y utilidades.....	104
3.3.2. Datos	106
3.3.3. Metodología de construcción de los diagramas de manejo de la densidad.....	107
3.3.4. Resultados.....	110
3.3.5. Ejemplo de uso de los diagramas de manejo de la densidad.....	114
3.4. Bibliografía.....	119
4. Modelos dinámicos de crecimiento	123
4.1. Introducción	123
4.1.1. Estructura de los modelos dinámicos de crecimiento desarrollados.....	125
4.1.2. Funciones de transición	126
4.1.3. Funciones de salida.....	128
4.1.4. Fuentes de datos para elaborar modelos dinámicos de crecimiento.....	130
4.2. Material y métodos	131
4.2.1. Datos	131
4.3. Resultados.....	134
4.4. Conclusiones y recomendaciones	139
4.5. Ejemplo de uso de los modelos dinámicos de crecimiento	141
4.6. Bibliografía.....	143
5. Modelos de crecimiento de árbol individual	147
5.1. Introducción	147
5.1.1. Estructura de los modelos de crecimiento de árbol individual	148
5.2. Material y métodos	150
5.2.1. Datos	150
5.2.2. Metodología.....	152
5.3. Resultados.....	155
5.4. Conclusiones y recomendaciones	157
5.5. Bibliografía.....	158
6. Desagregación de las variables del rodal	161
6.1. Introducción	161
6.2. Material y métodos	163
6.2.1. Concepto de función de densidad y función de distribución	163
6.2.2. La función de densidad Weibull.....	166
6.2.3. Estimación de los parámetros de una función de densidad.....	168
6.2.4. Datos	172

6.3. Resultados.....	173
6.4. Ejemplo de utilización del método de los momentos para la función de densidad Weibull de dos parámetros	174
6.5. Bibliografía.....	176
7. Relación altura-diámetro	179
7.1. Introducción	179
7.1.1. Funciones h-d locales	179
7.1.2. Funciones h-d generalizadas.....	181
7.2. Material y métodos	185
7.2.1. Datos	186
7.3. Resultados.....	188
7.4. Conclusiones y recomendaciones	189
7.5. Ejemplo de uso de funciones h-d locales y generalizadas	190
7.5.1. Utilización de la función h-d local.....	191
7.5.2. Utilización de la función h-d generalizada.....	192
7.6. Bibliografía.....	194
8. Herramientas para la cubicación con clasificación de productos	197
8.1. Introducción	197
8.1.1. Desarrollo de un sistema de estimación de volumen a partir de una función de perfil	198
8.2. Material y métodos	201
8.2.1. Datos	202
8.2.2. Ecuaciones para la cubicación con clasificación de productos.....	204
8.2.3. Ajuste del modelo de Fang et al. (2000).....	206
8.3. Resultados.....	207
8.4. Conclusiones y recomendaciones	208
8.5. Ejemplo de uso de las tarifas de cubicación con clasificación de productos	210
8.5.1. Volumen aprovechable para el destino 1.....	210
8.5.2. Volumen aprovechable para el destino 2.....	211
8.5.3. Volumen total y volumen no aprovechable	213
8.6. Bibliografía.....	213
9. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón	217
9.1. Introducción	217
9.2. Material y métodos	218
9.2.1. Datos	218
9.2.2. Modelos analizados y metodologías de ajuste	219
9.3. Resultados.....	222
9.4. Conclusiones y recomendaciones	223
9.5. Ejemplo de estimación del volumen a partir de las dimensiones del tocón	224
9.5.1. Estimación del volumen del tronco directamente a partir del diámetro del tocón	225

9.5.2. Estimación del volumen del tronco a partir del diámetro del tocón empleando una tarifa de cubicación de una entrada ajustada específicamente para el rodal.....	226
9.6. Bibliografía.....	228
10. Ecuaciones de biomasa	231
10.1. Introducción	231
10.2. Material y métodos	233
10.2.1. Datos	233
10.2.2. Modelos analizados y metodología de ajuste	236
10.3. Resultados.....	237
10.3.1. Ecuaciones de biomasa de árbol individual	237
10.3.2. Ecuaciones de biomasa de rodal.....	240
10.3.3. Factores de expansión de biomasa	241
10.4. Conclusiones y recomendaciones de uso	242
10.5. Ejemplo de estimación de biomasa forestal	243
10.5.1. Estimación de biomasa a partir de las ecuaciones de árbol individual	244
10.5.2. Estimación de biomasa a partir de las ecuaciones de rodal	246
10.5.3. Estimación mediante factores de expansión de biomasa	246
10.6. Bibliografía.....	247
Anexo I. Abreviaturas y notación.....	249
I.1. Abreviaturas	249
I.2. Notación	249
I.3. Bibliografía.....	253
Anexo II. Comparación, selección y validación de modelos	255
II.1. Bibliografía.....	257
Anexo III. Resumen de herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia.....	259

Presentación

Este libro es el resultado de quince años de investigaciones sobre el crecimiento y la producción de las principales especies forestales de Galicia en la Escuela Politécnica Superior de Lugo, de la Universidad de Santiago de Compostela.

En 1995, con el inicio de la docencia del segundo ciclo de Ingeniería de Montes, un pequeño grupo de profesores recién llegados a la Escuela Politécnica Superior de Lugo comenzamos a colaborar en diferentes trabajos de investigación relacionados con la modelización del crecimiento y la producción de las masas forestales de Galicia. Como consecuencia de esa colaboración diseñamos, y empezamos a instalar y a medir ese mismo año, una red de parcelas experimentales permanentes con la idea de poder disponer a corto-medio plazo de la información necesaria para elaborar herramientas selvícolas de apoyo a la gestión forestal de los montes gallegos, que por aquel entonces eran muy escasas.

El análisis de los datos obtenidos en la red nos ha permitido obtener la mayor parte de los resultados que hoy se presentan en este libro, que incluye diversas herramientas selvícolas para la mayoría de las especies con interés comercial en Galicia (curvas de calidad de estación, tarifas de cubicación con clasificación de productos, ecuaciones de biomasa, etc.), modelos de crecimiento básicos para rodales regulares de *Betula alba*, *Quercus robur* y *Pseudotsuga menziesii*, así como los últimos y más completos modelos dinámicos de crecimiento realizados para las plantaciones monoespecíficas de *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris*.

Para la consecución de todos estos resultados ha sido necesario, lógicamente, el trabajo continuado y conjunto de muchas personas, y no queremos dejar de resaltar que, desde el principio, siempre hemos contado con la inestimable colaboración de los técnicos y agentes de los servicios forestales de la *Xunta de Galicia*, que nos han ayudado en la localización de los lugares adecuados para la instalación de las parcelas y nos han facilitado los trabajos cuando ha sido necesario.

Por otra parte, el grupo de profesores que habíamos comenzado a instalar la red de parcelas nos unimos en el año 2002 con otros docentes de la Escuela Politécnica Superior para formar el grupo de investigación denominado Unidad de Gestión Forestal Sostenible (o UXFS, de sus siglas en gallego: *Unidade de Xestión Forestal Sostible*), que se encarga formalmente del mantenimiento y seguimiento de la red de parcelas permanentes de experimentación forestal iniciada en 1995. La UXFS, que pertenece desde 2002 al catálogo de grupos de investigación de la Universidad de Santiago de Compostela (código GI-1837-UXFS), es un grupo interdisciplinar de temática forestal que cuenta con profesores pertenecientes a los Departamentos de Ingeniería Agroforestal, Producción Vegetal y Edafología y Química Agrícola, y que realiza actividades de investigación así como trabajos y proyectos para empresas y administraciones públicas. Dentro de las líneas

habituales de trabajo de la UXFS destaca la que se centra en la modelización del crecimiento y la productividad forestal, origen de gran parte de los resultados que se incluyen en este libro. En 2006, y gracias a los méritos de los diferentes componentes del grupo, la UXFS obtuvo el reconocimiento de “Grupo de Referencia Competitiva del Sistema Universitario de Galicia” por parte de la *Consellería de Educación e Ordenación Universitaria* de la *Xunta de Galicia* (DOG de 13 de diciembre de 2006).

Se puede decir que tres diferentes “generaciones” de investigadores-docentes, contratados, becarios y personal auxiliar han participado y colaborado durante todos estos años en los trabajos de campo y gabinete necesarios para explotar adecuadamente la información recogida en las parcelas de la red de la UXFS. En primer lugar, el pequeño grupo de profesores que diseñamos y empezamos la instalación de las parcelas en 1995. En segundo término, un nutrido grupo de estudiantes que comenzaron al poco tiempo a realizar trabajos fin de carrera y, posteriormente, tesis doctorales sobre temas relacionados con las parcelas de la red, cuyos resultados forman el grueso del contenido de este libro. Nos gusta y enorgullece pensar que su trabajo en la UXFS ha contribuido a que varias de estas personas hayan conseguido estabilizarse profesionalmente en distintas empresas y universidades españolas, e incluso alguno, afortunadamente, en la propia Universidad de Santiago de Compostela. Actualmente, la gran mayoría de ellos sigue teniendo una relación directa con el grupo de investigación, como investigadores-colaboradores, y varios de ellos son, de hecho, autores de este libro. Y finalmente, una tercera y actual “generación” de investigadores y personal auxiliar, que está dando continuidad a los trabajos y actualizando las investigaciones sobre el crecimiento y la producción forestal en Galicia, algunos de los cuales también son autores del presente libro.

El trabajo de tantas personas durante todos estos años se ha traducido, entre otras cosas, en la realización de 11 tesis doctorales, cerca de 40 trabajos fin de carrera, más de 50 artículos publicados en revistas científicas españolas y extranjeras, y alrededor de 70 comunicaciones presentadas a congresos, todo ello directamente relacionado con las mediciones realizadas en la red de parcelas. Toda esta información, publicada en las fuentes mencionadas por las necesidades curriculares de sus autores, no está disponible fácilmente para el público en general y, en este caso particular, para los mayores interesados, que son los selvicultores y gestores forestales de Galicia y de las regiones próximas, así como los investigadores, docentes y estudiantes de las diferentes facultades y centros de investigación forestales. La idea de recopilar todos esos resultados en el presente libro representa para nosotros un imprescindible e importantísimo paso más en la investigación, que consiste en difundir y transferir los resultados obtenidos al sector de la sociedad interesado en ellos, y sin lo cual, en último término, no tiene sentido el enorme esfuerzo de todos estos años. En cualquier caso, este libro no es el punto final de nuestras investigaciones sobre el crecimiento y la producción forestal, sino simplemente un punto y seguido, un momento para pararnos a reflexionar, ordenar y divulgar todo el trabajo realizado en estos años, pero con la idea de continuar ampliando, mejorando y actualizando las investigaciones realizadas, como de hecho seguimos haciendo.

Nos interesa resaltar que hemos tratado de hacer un libro asequible a sus potenciales usuarios, pues aunque en el texto se haya tenido que utilizar un lenguaje técnico debido a la complejidad matemática y estadística de algunas de las herramientas presentadas, se incluye un CD-ROM con diversas aplicaciones informáticas que permiten su utilización de forma sencilla, y entre las que se encuentra la última versión del simulador de crecimiento y producción de rodales forestales GesMO® 2009 (v. 2.0). Este programa, en cuya versión que ahora se presenta se han incluido los últimos modelos dinámicos elaborados para las plantaciones gallegas de *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris*, permite simular y valorar económicamente diferentes opciones de tratamientos selvícolas (realización de distintos tipos de claras y de la corta final a diferentes edades), creando cuadros numéricos, gráficos e informes con la evolución de las principales variables de rodal para cada alternativa analizada. El origen de la creación del programa GesMO®, hace ya unos años, obedeció precisamente a la necesidad de contar con una herramienta que facilitara a los selvicultores y gestores forestales, así como a otros potenciales usuarios, la utilización de los más modernos y complejos modelos de crecimiento, y por tanto, para cumplir con la transferencia de los resultados de nuestras investigaciones al sector forestal. En ese sentido nos gusta recordar que la versión 1.0 del programa recibió en el año 2008 el reconocimiento de la Fundación de la Confederación de Empresarios de Lugo (CEL), al otorgarle un accésit del X Premio a la Iniciativa Empresarial en la modalidad de Proyectos de Investigación e Innovación Aplicada a la Empresa.

Además del trabajo de todas las personas antes relacionadas, para obtener los resultados que se presentan en este libro también ha sido necesario contar con una financiación continuada en el tiempo para instalar, inventariar, ampliar y dar seguimiento a la red de parcelas, además de mantener al equipo humano. Afortunadamente se ha conseguido esa financiación, que ha procedido de diversas fuentes, fundamentalmente de proyectos de investigación conseguidos en convocatorias públicas nacionales y autonómicas, y también en alguna ocasión de convenios con empresas o entidades no públicas.

Resulta imprescindible, por tanto, agradecer ahora el trabajo realizado a las numerosas personas que han participado durante todos estos años, y de una u otra manera, en los trabajos de la UXFS, a los técnicos y agentes forestales de la *Xunta de Galicia* que siguen colaborando con nosotros, a las administraciones y entidades que han financiado nuestras investigaciones y, finalmente, a la *Consellería do Medio Rural* de la *Xunta de Galicia*, y muy especialmente a la *Dirección Xeral de Montes*, por haber apoyado la realización de este libro.

Alberto Rojo Alboreca
Coordinador de la Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFS)

Contenido, estructura y uso de este libro

Este libro es una recopilación y actualización de las herramientas selvícolas de utilidad para la gestión sostenible de las masas forestales de Galicia, elaboradas en su mayor parte por miembros del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela. Su objetivo es difundir dichas herramientas entre los selvicultores y gestores forestales de Galicia y de las regiones próximas, además de entre investigadores, docentes y estudiantes de facultades y centros de investigación forestales, así como facilitar su utilización mediante aplicaciones informáticas de sencillo manejo.

En el primer capítulo del libro (Introducción) se definen y clasifican los diferentes modelos de crecimiento y producción forestales. A continuación se describe la red de parcelas permanentes de experimentación que la UXFS ha instalado en rodales de las especies forestales de mayor interés comercial por toda su área de distribución en Galicia, y que ha servido de base para la consecución de la mayoría de las herramientas selvícolas que se presentan. Después se relacionan, para cada especie, todos los modelos de crecimiento (curvas de calidad de la estación, tablas de producción, diagramas de manejo de la densidad, modelos dinámicos de rodal, modelos de árbol individual, etc.) que se han construido hasta la actualidad para Galicia, y se recomiendan aquellos de mayor utilidad para la gestión.

Los restantes capítulos incluyen una descripción pormenorizada de las herramientas selvícolas más modernas y útiles para la gestión de los montes gallegos. Para ello se estructuran de la siguiente manera: se realiza una breve introducción describiendo la herramienta, se indica el dispositivo experimental y la metodología utilizada para su elaboración, se presentan los resultados para las diferentes especies, se incluye un ejemplo de aplicación práctica y, finalmente, se reseña la bibliografía citada en el texto. Además, el libro va acompañado de un CD-ROM en el que se han incluido diversos archivos de Microsoft® Office Excel 2003 que permiten una aplicación sencilla de las herramientas selvícolas que se presentan en los distintos capítulos, así como la última versión del simulador informático de crecimiento y producción de rodales forestales GesMO® 2009.

El capítulo 2 (Calidad de estación) está dedicado a las curvas de calidad de estación, que son el paso previo e imprescindible para poder aplicar los modelos de crecimiento que se incluyen en los capítulos siguientes. Se presentan los últimos estudios de calidad de estación realizados en Galicia para las especies *Betula alba* L., *Eucalyptus globulus* Labill., *Pinus pinaster* Ait. (distinguiendo entre las zonas costera e interior), *Pinus radiata* D. Don, *Pinus sylvestris* L., *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Quercus robur* L. En el CD-ROM se incluye el archivo 02_CE.xls ("Calidad de Estación"), de Microsoft® Office Excel 2003, que permite hacer los siguientes cálculos para cualquier rodal regular de las especies anteriores: estimar el índice de sitio a partir de la edad y altura dominante del rodal, así como representar este par de datos sobre

un gráfico que contiene las curvas de calidad; estimar la altura dominante a una edad determinada a partir de la altura dominante a otra edad; y estimar la altura dominante a una edad determinada a partir del índice de sitio.

En el capítulo 3 (Modelos estáticos de crecimiento y producción) se presentan unas tablas de producción y unos diagramas de manejo de la densidad para los rodales regulares de *Betula alba*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*. Estas herramientas son los modelos de crecimiento y producción más avanzados que se pueden construir actualmente para las tres especies, teniendo en cuenta los datos experimentales con los que se cuenta hoy en día. Aunque también existen tablas de producción y/o diagramas de manejo de la densidad para otras especies forestales gallegas (concretamente para *Pinus pinaster* en las zonas de costa e interior, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris*), no se incluyen en este libro debido a que para dichas especies se han elaborado modelos más flexibles y de mayor utilidad práctica, que se presentan en el siguiente capítulo. En el CD-ROM adjunto al libro se incluye un archivo de Microsoft® Office Excel 2003 denominado 03a_TP.xls (“Tablas de Producción”), que permite generar una tabla de producción de un rodal de alguna de las tres especies consideradas, para su calidad de estación específica. También se incluye el archivo 03b_DMD.pdf (“Diagramas de Manejo de la Densidad”), en el que se muestran los diagramas de manejo de la densidad de dichas especies.

A continuación, en el capítulo 4 (Modelos dinámicos de crecimiento) se describen las últimas versiones de los más flexibles y útiles modelos dinámicos de crecimiento de rodal, correspondientes a las especies *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris*. Para facilitar su aplicación práctica, dada su complejidad, se han implementado en la última versión del simulador informático de crecimiento y producción de rodales forestales GesMO® 2009, que también se incluye en el CD-ROM adjunto, junto con un manual de usuario que describe todas las utilidades y el uso del programa. GesMO® 2009 permite, de forma sencilla, simular y valorar económicamente diferentes alternativas de tratamientos selvícolas (en función del tipo, intensidad y edad de las claras, así como de la edad de la corta final) generadas por el propio usuario, creando cuadros numéricos, gráficos e informes que muestran la evolución de las principales variables de rodal para cada alternativa.

El capítulo 5 (Modelos de crecimiento de árbol individual) presenta una descripción del único modelo de este tipo elaborado hasta el momento para Galicia, de la especie *Pinus radiata*. Este modelo proporciona salidas con mayor nivel de detalle que el modelo dinámico de rodal para la especie, y puede ser útil para realizar proyecciones a corto plazo, por ejemplo, en los planes especiales de los proyectos de ordenación de montes.

En el capítulo 6 (Desagregación de las variables de rodal) se explican las metodologías que permiten caracterizar y estimar la distribución diamétrica de un rodal a partir de valores conocidos de sus principales variables dasométricas, así como su aplicación a rodales regulares monoespecíficos de las especies *Betula alba*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*. También se incluye en el CD-ROM un archivo de Microsoft® Office Excel 2003, denominado 06_DD.xls (“Distribución Diamétrica”), que permite realizar la desagregación de forma sencilla.

El capítulo 7 (Relación altura-diámetro) se dedica a las funciones que relacionan la altura de los árboles con su diámetro normal y otras variables de rodal, que se denominan funciones altura-diámetro generalizadas, y que tienen una gran utilidad práctica para estimar la altura de todos los pies de un rodal o parcela y, por tanto, para estimar su volumen. Se presentan las últimas ecuaciones de este tipo ajustadas para rodales regulares y monoespecíficos de las especies *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*, así como un archivo de Microsoft® Office Excel 2003 en el CD-ROM adjunto, de nombre 07_HDG.xls (“Altura Diámetro Generalizada”), para aplicarlas de manera sencilla.

El capítulo 8 (Herramientas para la cubicación con clasificación de productos) incluye las funciones de perfil que han permitido desarrollar herramientas para la cubicación con clasificación de productos para seis de las especies forestales con mayor interés comercial en Galicia (*Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*). Además, se ha incluido en el CD-ROM otro archivo de Microsoft® Office Excel 2003, denominado 08_TCCP.xls (“Tarifas de Cubicación con Clasificación de Productos”), con el objeto de facilitar la utilización práctica de estas herramientas a los potenciales usuarios. En dicho archivo se automatiza el proceso de cubicación con clasificación de productos a partir de los datos de diámetro normal y altura de un conjunto de árboles, así como de las dimensiones requeridas según diferentes destinos comerciales.

A continuación, en el capítulo 9 (Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón) se presentan una serie de ecuaciones que permiten obtener el diámetro normal o el volumen de un árbol a partir de las dimensiones del tocón (generalmente su diámetro), desarrolladas para las especies *Betula alba*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Quercus robur*. Estas ecuaciones son de utilidad para estimar el volumen de árboles o rodales ya cortados y, por tanto, para la realización de comprobaciones, valoraciones y peritaciones. Al igual que en los capítulos anteriores, se ha incluido en el CD-ROM adjunto el archivo 09_TOC.xls (“Tocón”), de Microsoft® Office Excel 2003, para hacer más sencilla su utilización práctica.

En el capítulo 10 (Ecuaciones de biomasa) se muestran las ecuaciones disponibles para estimar la biomasa de árbol individual, por fracciones y total, de las principales especies arbóreas gallegas (*Betula alba*, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Quercus robur*) y se indican las ecuaciones de estimación a nivel de rodal que hasta el momento se han ajustado para *Pinus pinaster* (costa e interior) y *Pinus radiata*. También se ha incluido en el CD-ROM que acompaña al libro un archivo de Microsoft® Office Excel 2003, denominado 10_BIO.xls (“Biomasa”), para aplicar de manera sencilla dichas ecuaciones.

El libro concluye con tres anexos. En el primero se detallan las abreviaturas y la notación de las variables utilizadas en todo el libro. En el segundo se describen los métodos de comparación y selección de modelos empleados en el desarrollo de las herramientas selvícolas presentadas en los distintos capítulos. En el último anexo se incluye, como resumen y guía de utilización del libro, una tabla en la que se relacionan las diferentes herramientas selvícolas disponibles para cada

especie, indicando el capítulo del libro donde pueden consultarse y el archivo o programa del CD-ROM en el que están implementadas.

Para finalizar, es necesario advertir que los resultados que se obtengan de la aplicación de las herramientas selvícolas que se presentan en este libro, y por tanto su utilidad práctica, van a depender de manera fundamental de la representatividad de los datos de partida que se utilicen. Si los datos son imprecisos o insuficientes para la finalidad que se persigue, entonces los resultados de aplicar las herramientas selvícolas serán, igualmente, erróneos e inadecuados. Los datos de partida deben ser actuales, suficientes para hacer estimaciones estadísticas fiables (lo que viene determinado por el error de muestreo cometido en la estimación de las variables medias) y relativamente libres de errores de medición. Nunca se debe asumir que los datos de partida son precisos o adecuados y, por tanto, usarlos sin evaluar su validez previamente. Es responsabilidad exclusiva de los selvicultores, gestores y otros potenciales usuarios conocer la precisión de sus datos y, consecuentemente, evaluar la validez real de los resultados que se pueden conseguir al aplicar con ellos las herramientas selvícolas que se ponen a su disposición en este libro.

1. Introducción

1.1. Modelización forestal. Generalidades

1.1.1. La planificación de la gestión forestal sostenible

Actualmente existe consenso a nivel mundial sobre la necesidad de aplicar en los sistemas forestales de todo el planeta lo que se ha definido como una gestión forestal sostenible, es decir, aquella ambientalmente responsable, socialmente beneficiosa y económicamente viable.

La ciencia forestal, después de más de doscientos años de experiencias, ha creado métodos muy diferentes para la consecución del objetivo de sostenibilidad, en consonancia con la enorme diversidad de sistemas forestales existentes en todo el mundo. Dichos sistemas de gestión forestal sostenible se pueden dividir, de forma muy simplificada, en dos grandes grupos (Gadow, 2001): por una parte los denominados en inglés *Rotation Forest Management* (RFM) o sistemas de gestión forestal de turno de corta, y por otra parte los llamados *Continuous Cover Forestry* (CCF) o sistemas de gestión de cubierta forestal continua.

Los RFM son todos aquellos sistemas de gestión en los que se aplican ciclos repetitivos de silvicultura caracterizados fundamentalmente por la existencia de un turno o edad de corta final. Los ciclos selvícolas están conformados por varias fases: una primera de renovación mediante plantación o regeneración natural, dando lugar a rodales coetáneos o regulares¹; una segunda fase en la que se realizan, o no, una o varias claras y diversos tratamientos culturales de mejora; y una tercera fase de aprovechamiento final cuando se llega al turno, repitiéndose entonces el mismo esquema de forma sucesiva (figura 1.1).

Un ejemplo de este tipo de gestión son los eucaliptales de Galicia, de la Cornisa Cantábrica y del norte de Portugal, en cuyos ciclos productivos no se aplican claras, se hace la corta final de una sola vez a la edad del turno y la renovación tras la corta se produce por rebrote de las cepas (durante tres o cuatro rotaciones, tras las cuales se realiza una plantación). En esas mismas regiones se gestionan por un sistema similar las plantaciones de *Pinus pinaster*, aunque en este caso sí se aplican una o varias claras (dependiendo del objetivo productivo y de la calidad de estación) y la regeneración tras la corta final a hecho puede ser por medios naturales o artificiales. Otro ejemplo de un sistema RFM es la gestión tradicional de algunos pinares naturales de *Pinus sylvestris* en el Sistema Central y en otras zonas de España, consistente en la realización

¹ Un rodal regular es aquel en el que al menos el 90% de los pies pertenecen a la misma clase artificial de edad, entendida como un intervalo de edades de duración igual al menor de los números siguientes: veinte años o la cuarta parte del turno (Ministerio de Agricultura, 1970). Un rodal coetáneo es aquel en el que al menos el 90% de los pies tienen la misma edad individual (Madrigal, 1994).

de varias claras y de una corta final por aclareo sucesivo buscando la regeneración natural, con la que se vuelve a iniciar el ciclo selvícola.

En contraposición a los RFM, los muy diversos métodos de gestión CCF se caracterizan, principalmente, por la indefinición de la edad de las masas y, por tanto, por la ausencia de un turno para el rodal que marque el momento del aprovechamiento, por lo que las cortas se basan en mantener las existencias dentro de un intervalo ideal de volumen o área basimétrica (figura 1.1). En estos sistemas se aplican, entonces, cortas selectivas (nunca a hecho) buscando la regeneración natural y el mantenimiento de una cubierta forestal permanente, y se prefieren y favorecen las masas mixtas irregulares y las especies autóctonas. Documentadas revisiones de la historia, definiciones, conceptos, métodos y aplicaciones de los sistemas CCF pueden encontrarse en Gadow et al. (2002) y en Pommerening y Murphy (2004).

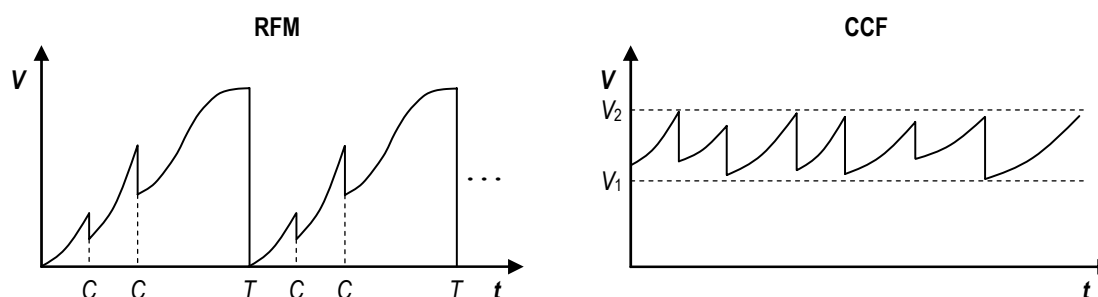


Figura 1.1. Representación gráfica de la evolución de las existencias (volumen, V) con el tiempo (t) en los sistemas de gestión forestal RFM y CCF. En los sistemas RFM se repite cíclicamente el esquema selvícola: plantación o regeneración natural, en ocasiones una o varias claras C , y corta final a la edad del turno T . En los sistemas CCF las cortas tratan de mantener las existencias dentro de un determinado intervalo V_1 - V_2 .

Aunque actualmente algunas áreas gestionadas tradicionalmente mediante sistemas RFM en Europa (y en otras partes del planeta) están siendo convertidas a una gestión del tipo CCF (Mason y Kerr, 2004), los sistemas de gestión forestal de turno de corta siguen siendo los mayoritariamente aplicados en rodales regulares de todo el mundo, y en la mayor parte de los casos con fines productivos.

En Galicia, un 78% de los rodales existentes son coetáneos o regulares (Xunta de Galicia, 2001), es decir, de la misma edad o de la misma clase artificial de edad, lo que implica que se gestionan o se han gestionado hasta el momento mediante sistemas RFM. Por tanto, todas las herramientas selvícolas que se presentan en este libro se refieren y están basadas en datos de rodales gestionados mediante estos sistemas.

Cualquier tipo de gestión incluye necesariamente una fase de planificación y una de toma de decisiones, que en el caso forestal pueden referirse a distintas escalas o niveles (figura 1.2), dependiendo del alcance de las mismas y del nivel de información disponible (Valsta, 1993).

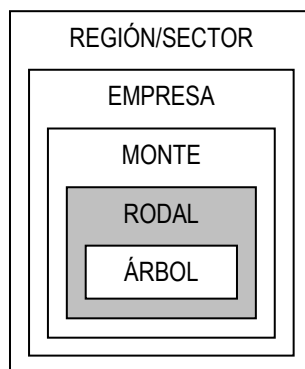


Figura 1.2. Diferentes niveles de toma de decisiones en la gestión forestal (Valsta, 1993).

El nivel de rodal es el primero con verdadero significado en la planificación y la toma de decisiones; de hecho, la mayoría de las teorías económicas en el campo forestal se basan en el análisis a este nivel. En este caso, cada rodal individual se trata de la manera que mejor cumpla los objetivos del propietario forestal (Clutter et al., 1983). A pesar de sus limitaciones, los resultados obtenidos a nivel de rodal pueden utilizarse como guías para la gestión, y servir de base sobre la que realizar modificaciones para satisfacer cada decisión particular.

Sin embargo, en situaciones en las que se requiera estabilidad en las cortas, en los ingresos, en las superficies de regeneración, etc., deben utilizarse métodos de planificación basados en la gestión a escala monte, que pueden llevar a hacer caso omiso de aspectos económicos a nivel de rodal (Clutter et al., 1983). Además, la planificación espacial de las cortas puede presentar también restricciones a la gestión a este nivel (Brodie y Sessions, 1991).

Por tal motivo, la planificación y la toma de decisiones sobre el óptimo de gestión de un rodal no pueden tomarse independientemente de niveles de ámbito superior en la mayoría de los casos, debiendo considerarse las restricciones que imponen, por ejemplo, las necesidades de abastecimiento de madera a nivel de monte o comarca. En consecuencia, parece razonable especificar un conjunto de regímenes selvícolas flexibles para cada rodal, en vez de sólo el óptimo para un objetivo concreto, e intentar satisfacer así el amplio abanico de restricciones existentes en la gestión forestal.

1.1.2. Los modelos forestales de crecimiento

La necesidad de predecir el crecimiento y la producción de los árboles y las masas forestales, así como su respuesta a las actuaciones selvícolas, ha sido y es uno de los objetivos fundamentales de la investigación forestal, ya que la clave para una correcta gestión radica en un profundo conocimiento de los procesos de desarrollo de las especies forestales. En este sentido, los modelos de crecimiento y producción son unas herramientas muy valiosas para los selvícultores y gestores forestales, al permitir predecir el desarrollo de los árboles y/o las masas forestales y, por tanto, facilitar la selección de las mejores alternativas de gestión en función de

unos objetivos fijados de antemano, anticipándose a las consecuencias que una determinada acción puede tener sobre el sistema forestal.

Un modelo es una abstracción simplificada de la realidad, en la que solamente se reproducen algunas propiedades del objeto o sistema original, que entonces queda representado por otro objeto o sistema de menor complejidad.

En el caso de los modelos forestales de crecimiento (muchas veces denominados modelos de crecimiento y producción), el sistema original está constituido normalmente por árboles individuales, grupos de árboles o por algunos de los rodales¹ que forman las masas forestales, por lo que dichos modelos tratan de representar de forma simplificada aspectos más o menos complejos relativos a la dinámica de esos sistemas. Así, por ejemplo, los modelos de crecimiento y producción de rodales forestales suelen comprender el crecimiento propiamente dicho, la mortalidad y otros cambios en su composición y estructura. Esos elementos que incluyen los modelos se expresan como un conjunto de ecuaciones matemáticas, como la lógica necesaria para relacionarlas de un modo coherente e, incluso, como el código de programación requerido para implementar el modelo en un simulador informático. En un sentido más amplio, el término “modelo de crecimiento” también puede englobar tablas y curvas, que son análogas a las ecuaciones, pero que se presentan en forma tabular o gráfica en vez de matemática (Vanclay, 1994).

La modelización forestal, como caso particular de cualquier otra modelización, se rige por dos principios fundamentales: un conocimiento exhaustivo del sistema que se pretende modelizar y un establecimiento previo, y con la mayor exactitud posible, de los objetivos concretos que se pretenden alcanzar.

El sistema forestal (un rodal, un grupo de árboles o un árbol) se caracteriza básicamente por alternar a lo largo del tiempo etapas de evolución natural y cambios instantáneos en su estructura y composición debidos a la acción humana. Las etapas de evolución natural dependen de las características del medio en el que se asienta el sistema, y en ellas pueden existir alteraciones debidas a procesos de mortalidad natural y a daños bióticos o climatológicos. Intercaladas con estas fases de crecimiento natural se suceden alteraciones debidas a la acción humana (tratamientos selvícolas: clareos, claras, podas, etc.) que afectan a la evolución natural del sistema (figura 1.3).

¹ El diccionario forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (2005) incluye dos acepciones del término “rodal”: 1. *Espacio forestal de superficie variable en el que existe constancia de características de estación y de masa, que puede tener un tratamiento uniforme en la medida en que tenga una única función preferente.* 2. *Parte del monte uniforme en cuanto a especie o grupo de especies principales, edad, calidad y estado, independientemente de su extensión y rellenando un recinto simple y homogéneo.* Por su parte, el término “masa” se define como: *Conjunto de árboles u otras plantas forestales que pueblan una superficie dada.* Según estas definiciones, una masa forestal estaría formada por distintos rodales. En adelante se utilizará el término “modelo de rodal” para referirse a aquellos modelos que describen el crecimiento y/o la producción conjunta de todos los árboles en una determinada superficie con características de estación y de masa homogéneas.

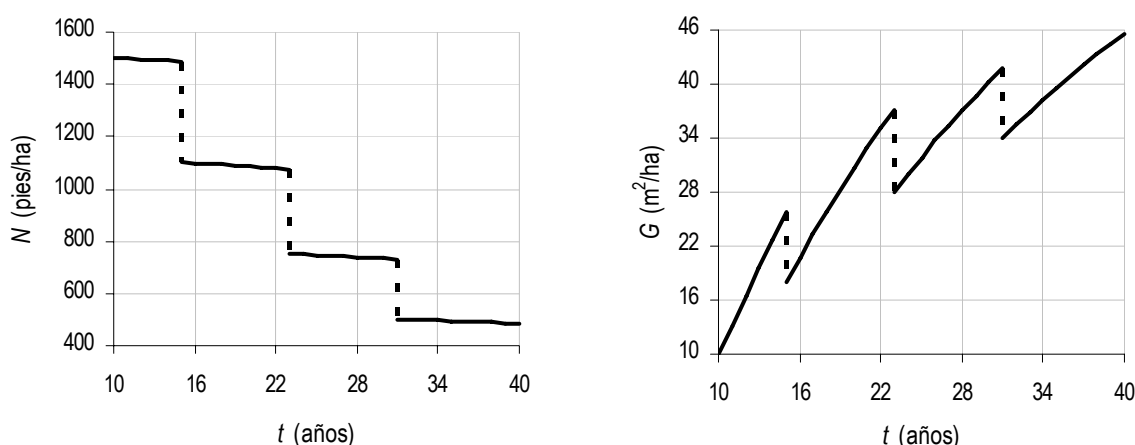


Figura 1.3. Períodos de evolución natural (línea continua) y alteraciones debidas a la acción humana (claras, línea discontinua) en el desarrollo de un rodal forestal regular. Nota: N = número de pies; G = área basimétrica; t = edad.

Por otra parte, el objetivo de los modelos forestales de crecimiento es determinar la evolución en el tiempo de una o varias variables dendrométricas (de árbol individual) o dasométricas (de rodal) que se definen en el sistema a estudiar.

Hoy en día, cada vez es más frecuente publicar y distribuir el conjunto de ecuaciones que describen un modelo, así como los programas de ordenador (o simuladores informáticos) en los que se suelen implementar, que normalmente se pueden descargar en Internet de las páginas Web de los organismos o personas que los elaboran, para que el usuario los utilice en función de sus necesidades.

1.1.3. Clasificación de los modelos forestales de crecimiento

La evolución de los tipos de modelos forestales de crecimiento ha ido en paralelo al aumento en cantidad y complejidad de la información requerida por los selvicultores y gestores forestales. Así, por ejemplo, de tener que evaluar sólo el volumen de madera se ha pasado a tener que estimar la biomasa, el contenido en nutrientes y el carbono acumulado por los ecosistemas forestales, debido a la necesidad de cumplir con las nuevas expectativas ambientales, sociales y económicas de la gestión forestal sostenible.

Existe, por tanto, una gran variedad de modelos forestales de crecimiento, así como, al menos, las siguientes cuatro diferentes formas de clasificarlos:

- ✓ Modelos de rodal, de clases dimensionales y de árbol individual.
- ✓ Modelos estáticos y dinámicos.
- ✓ Modelos determinísticos y estocásticos.
- ✓ Modelos empíricos, basados en procesos e híbridos.

Estas cuatro clasificaciones no son excluyentes, por lo que cuando se hace referencia a un modelo de crecimiento forestal es necesario indicar todas aquellas características que permitan

caracterizar de la manera más precisa posible el tipo de modelo de que se trate. Así, por ejemplo, unas tablas de producción de selvicultura media observada (ver capítulo 3) se pueden clasificar como un modelo de rodal, estático, determinístico y empírico.

Además, en todos los casos se asume que los modelos presentados se identifican por especies y por su aplicabilidad geográfica o de condiciones ambientales, de manera que estos factores no se consideran como criterios de clasificación.

La intención al presentar estas diferentes clasificaciones, que se detallan a continuación, es sentar las bases terminológicas que permitan comprender algunos de los capítulos que constituyen este libro, que se ha organizado en parte siguiendo las dos primeras. Así, se dedica específicamente el capítulo 3 a los modelos de rodal estáticos, el capítulo 4 a los modelos de rodal dinámicos y el capítulo 5 a los de árbol individual.

Modelos de rodal, de clases dimensionales y de árbol individual

Esta clasificación atiende a las diferentes unidades de predicción que puede considerar un modelo según el nivel de detalle: el rodal completo, todos los árboles de una determinada especie, clase de edad o de tamaño (siendo esto último lo más habitual, por lo que en adelante se referirá exclusivamente este tipo de modelos como de clases dimensionales o diamétricas), o un árbol individual. Existen otros modelos de ámbito superior al rodal que simulan la evolución de bosques completos o incluso de una región (Persson, 1992; Gadow et al., 2001), cuya finalidad es obtener información sobre grandes superficies forestales normalmente ligada a objetivos de ordenación del territorio, pero son poco frecuentes y, desde el punto de vista de la gestión forestal práctica, poco útiles.

Los modelos de rodal (ver capítulos 3 y 4) informan sobre el desarrollo probable del conjunto de árboles que lo constituyen. Su principal ventaja es que requieren poca información (sólo variables de rodal) para, mediante una serie de funciones matemáticas, estimar el crecimiento y el volumen futuros, por lo que son los modelos más sencillos y, a su vez, los más robustos en proyecciones a largo plazo, proporcionando generalmente buenas estimaciones de las variables dasométricas (Burkhardt, 2003). Sin embargo, son los modelos de menor nivel de detalle, no permitiendo conocer cómo se reparte la producción del rodal entre las distintas clases (habitualmente de tamaños) de los árboles, razón por la cual se desarrollaron los otros tipos de modelos comentados (los de clases dimensionales y los de árbol individual).

Los modelos de clases dimensionales surgieron, por tanto, para dar respuesta a las necesidades de información sobre el número de árboles de diferentes tamaños que hay en rodales monoespecíficos y regulares. Estos modelos permiten simular de manera separada el crecimiento en cada clase (diamétrica o de área basimétrica) mediante el cálculo de las características del árbol medio representativo de cada una de ellas (p. ej., volumen, crecimiento en diámetro, etc.). La escasa disponibilidad de datos que hagan posible el desarrollo de modelos de árbol individual (muchas veces relativos a dimensiones de la copa, distancia entre pies, etc.), junto con la necesidad de conocer mejor el tipo de productos que se pueden obtener en un rodal,

hacen que en determinadas circunstancias sea interesante el uso de modelos de clases dimensionales.

Los modelos de árbol (ver capítulo 5) son los más complejos y los de mayor nivel de detalle, ya que tratan de describir el crecimiento individual de cada uno de los árboles de un rodal a partir de los fenómenos que lo condicionan. La mayoría de los modelos de árbol individual utilizan un índice de competencia en las ecuaciones de crecimiento de cada pie, como una medida de su interacción con otros árboles del rodal en la lucha por la luz, el agua, los nutrientes y el espacio de crecimiento. Este índice se utiliza para determinar si el árbol está vivo o muerto y, si vive, para estimar su crecimiento en términos del diámetro y, en ocasiones, de la altura y del tamaño de copa. Existen numerosas metodologías para calcular los índices de competencia en estos modelos, que pueden dar lugar a una distinción general de los mismos. Si los cálculos se basan en la distancia medida entre cada árbol y todos los que están dentro de su zona de competencia, los modelos se denominan dependientes de la distancia (y en ellos, entonces, es necesario conocer las coordenadas de los árboles dentro del rodal). Si el índice de competencia se basa solamente en las características del árbol objetivo y en características del rodal en que está incluido, se trata de un modelo independiente de la distancia (Davis et al., 2001). Los inconvenientes de este tipo de modelos son que requieren un gran volumen de datos para su construcción y utilización, algunos de ellos muy costosos de conseguir, y que exigen una elaboración metodológicamente más compleja si se comparan con los otros (de rodal y de clases dimensionales).

Es importante señalar que los modelos de rodal proporcionan directamente resultados por unidad de superficie de las principales variables dasométricas (p. ej., evolución del número de pies, del área basimétrica, del volumen total y/o comercial), mientras que en los otros tipos de modelos, de mayor nivel de resolución, los resultados del rodal se pueden obtener agrupando los correspondientes a las diferentes clases dimensionales o a los árboles individuales.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, cuando se pretenda modelizar el crecimiento de un rodal será necesario elegir con qué nivel de detalle trabajar. El tipo de modelo más adecuado dependerá del uso a que se quiera destinar, de las características del rodal, de los recursos disponibles y del intervalo de proyección (Vanclay, 1994; Burkhart, 2003; García, 2003), factores que también determinan los datos necesarios y la resolución del modelo. Ya se ha comentado que los modelos de crecimiento de árbol individual proporcionan la información más detallada, pero además, para la modelización a nivel de árbol no existen límites predefinidos en cuanto a la mezcla de especies, tratamientos selvícolas, edad e incidencia de plagas, enfermedades o daños abióticos (Hasenauer, 2006). La frecuente aplicación de claras por calles, así como la utilidad de estos modelos para evaluar parcelas de ensayo de material genético, justifican el esfuerzo investigador en este campo. Sin embargo, la aplicación de modelos de rodal es, con frecuencia, suficiente para la gestión habitual de plantaciones forestales y, en general, de rodales regulares monoespecíficos. Por otra parte, para realizar proyecciones a largo plazo es preferible utilizar modelos de rodal, que resultan más sencillos y robustos, pero si el objetivo es realizar

proyecciones a corto plazo y con gran nivel de detalle conviene utilizar modelos de árbol individual (Burkhardt, 2003).

Por otra parte, otro aspecto importante a tener en cuenta sería conseguir la compatibilidad (o igualdad de resultados) a nivel de rodal entre las estimaciones proporcionadas por los modelos de rodal y las obtenidas por agregación de las de los modelos de árbol individual.

Modelos estáticos y dinámicos

Los modelos de crecimiento y producción estáticos son sistemas estructurados de relaciones matemáticas, estadísticas y/o lógicas que no dependen, o no tienen en cuenta explícitamente, la tasa de crecimiento de los árboles y/o los rodales forestales. Así, son estáticos los modelos de rodal que se construyen a partir de los datos recogidos en un único inventario de una serie de parcelas, ya que se desconoce el crecimiento de las variables de cada rodal particular, pero también los contruidos a partir de parcelas inventariadas en más de una ocasión si la metodología de ajuste empleada no ha tenido en cuenta los crecimientos observados en cada parcela. Ejemplos de modelos estáticos de rodal son las tablas de producción y los diagramas de manejo de la densidad, que se describen detalladamente en el capítulo 3.

Por su parte, los modelos dinámicos sí tienen en cuenta la evolución en el tiempo (es decir, el crecimiento) de las variables descriptivas de los árboles y/o los rodales forestales, por lo que para su construcción es necesario disponer de datos recogidos en árboles o rodales inventariados al menos en dos ocasiones, y además el ajuste estadístico debe de realizarse con una metodología que permita tener en cuenta dicho crecimiento. En el capítulo 4 se presentan diferentes modelos dinámicos de rodales forestales.

Los modelos de crecimiento estáticos pueden dar lugar a buenos resultados en rodales no aclarados o en aquellos sometidos a un rango reducido de tratamientos estándar de los que se disponga de un gran número de datos experimentales (que deben cubrir todas las combinaciones de edad, densidad y calidad existentes en la zona de estudio). Sin embargo, para poder proyectar al futuro el estado de un rodal considerando un amplio rango de regímenes selvícolas (espaciamiento inicial, peso y rotación de claras), o cuando se dispone de datos procedentes de muy diversos tipos de parcelas experimentales o de inventario en las que se han aplicado distintos tratamientos, es necesario elaborar modelos dinámicos, ya que son los únicos capaces de considerar adecuadamente la relación causa-efecto entre la densidad de la masa y la producción en volumen. La mayor ventaja de los modelos dinámicos de rodal es que la evolución de la densidad es hasta cierto punto libre y, con frecuencia, se incluye el efecto de operaciones culturales. Además, estos modelos representan alternativas más completas y realistas que los modelos estáticos, ofreciendo mayores posibilidades para la gestión.

Modelos determinísticos y estocásticos

La diferencia entre los modelos determinísticos y los estocásticos radica en que los primeros generan siempre los mismos resultados ante el mismo escenario (mismos datos de entrada y

mismos algoritmos), mientras que con los segundos se obtienen resultados diferentes cada vez que se realiza la simulación, debido a la introducción deliberada de una componente aleatoria en el modelo. Para ello, el método más utilizado es la introducción de “ruido” (mediante un generador de números aleatorios) en una o más etapas de la simulación, que trata de imitar las variaciones de crecimiento producidas por las condiciones climáticas, de suelo, genéticas, etc. y los errores de medición.

La incorporación de ese factor aleatorio en los modelos de crecimiento es importante cuando se desea preservar la variabilidad en las predicciones (Stage, 1973). Un ejemplo evidente de la necesidad de emplear modelos estocásticos lo constituye la relación altura-diámetro de un rodal regular, al menos si se quiere imitar la variabilidad natural mediante la cual a dos árboles de un mismo diámetro les pueden corresponder alturas diferentes. En este caso, podría utilizarse la parte determinística de la relación altura-diámetro para estimar la altura media que correspondería a un determinado diámetro y, conociendo el tipo de distribución que siguen las alturas dentro de cada clase diamétrica, utilizar un factor aleatorio para asignar alturas diferentes a cada uno de los dos árboles.

Modelos empíricos, basados en procesos e híbridos

Los modelos empíricos son aquellos que explican la dinámica de los árboles y/o los rodales forestales a partir de datos experimentales obtenidos en parcelas de investigación en una región determinada, representando fielmente la realidad observada pero sin tener en cuenta los mecanismos y procesos elementales de crecimiento. Su interés radica en que, a partir de variables muy fáciles de medir, proporcionan estimaciones cuantitativas muy importantes para la gestión forestal, por lo que son los modelos más empleados desde el punto de vista práctico. Su principal inconveniente es que su rango de aplicación está limitado por los datos que se hayan empleado en el ajuste y por la zona geográfica en que se hayan recogido, por lo que no se pueden utilizar para zonas diferentes ni tener en cuenta, por ejemplo, otras condiciones climáticas.

La búsqueda de una base fisiológica y ecológica para las técnicas de modelización fue una de las causas de la aparición de los modelos basados en procesos, que se pueden definir, por tanto, como aquellos que tratan de incorporar a la simulación una interpretación del crecimiento de los árboles fisiológica y ecológicamente fundamentada, para lo que suelen incluir factores como la luz, el ciclo de nutrientes, el balance de carbono, el índice de área foliar, etc. La principal ventaja de los modelos basados en procesos es que son sensibles a los cambios ambientales (de la estación forestal, ver capítulo 2), siendo por tanto de aplicación más general que los modelos empíricos (Erviti, 1991). Además, poseen gran valor científico por cuanto ayudan a conocer con detalle el funcionamiento del sistema forestal, base imprescindible en numerosas investigaciones. Sus mayores inconvenientes son su complejidad y la gran cantidad y variedad de datos que requieren (que generalmente no se miden en los inventarios forestales tradicionales), por lo que son poco relevantes en la práctica para la gestión forestal. Por otra parte, el grado de complejidad de estos modelos es muy variado, siendo mayor cuanto más se alejan del enfoque clásico de los modelos de crecimiento empíricos. Además, los modelos basados en procesos se han

desarrollado, en la mayoría de los casos, independientemente de los modelos empíricos, por lo que su grado de compatibilidad es mínimo.

Para aunar las ventajas de ambos tipos de modelos, evitando sus inconvenientes, se desarrollaron los modelos que se denominan híbridos, ya que tratan de incorporar las influencias medioambientales en los modelos de crecimiento y producción empíricos, mediante el establecimiento de relaciones entre algunas de sus salidas o entradas. Así, se incorporan variables edáficas y climáticas a los modelos empíricos, mejorando sensiblemente la precisión de las estimaciones. Las ventajas de los modelos híbridos son su mayor realismo biológico frente a los modelos empíricos tradicionales, sin requerir el elevado nivel de información de los modelos basados en procesos, y que proporcionan salidas válidas para la gestión forestal práctica a partir de datos tomados en inventarios viables económicamente. Su mayor inconveniente es que están todavía poco desarrollados.

1.2. La red de parcelas permanentes de experimentación forestal de la Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFS)

La mayor parte de los resultados que se presentan en este libro se han obtenido a partir de los datos recogidos en la red de parcelas permanentes de experimentación forestal instalada y mantenida por el grupo de investigación Unidad de Gestión Forestal Sostenible (o UXFS, de sus siglas en gallego: *Unidade de Xestión Forestal Sostible*), de la Universidad de Santiago de Compostela (USC).

El objetivo principal de la red, que comenzó a instalarse en 1995, fue establecer un dispositivo experimental permanente del que pudiera conseguirse, en un plazo de tiempo lo más corto posible, información adecuada y suficiente para elaborar modelos de crecimiento (curvas de calidad de estación, tablas de producción, diagramas de manejo de la densidad, modelos dinámicos de rodal, modelos de árbol individual, etc.) y otras herramientas selvícolas (tarifas de cubicación con clasificación de productos, ecuaciones de biomasa, etc.) de apoyo para la gestión forestal de los montes de Galicia. Es necesario recordar que en esa época había muy pocos trabajos de ese tipo elaborados con datos de rodales forestales de Galicia, y que la aplicabilidad a las condiciones del medio gallego de las herramientas construidas para otras regiones o países era, en el mejor de los casos, dudosa.

En cuanto a las especies estudiadas en la red de la UXFS, en ese año 1995, cuando se comenzó su instalación, pareció prioritario, y así se hizo, concentrar el esfuerzo en aquellas especies forestales de mayor interés comercial y de las cuales casi no se tenía información selvícola adaptada a las condiciones de los montes gallegos. Puesto que los únicos trabajos importantes de crecimiento y producción forestal existentes entonces para Galicia estaban centrados en *Eucalyptus globulus* (por parte de empresas de celulosa) y en *Pinus pinaster* (a cargo del Centro de Investigaciones Forestales, CIF, de Lourizán), se decidió comenzar la red

instalando las primeras parcelas de crecimiento en plantaciones de *Pinus radiata* y de *Pinus sylvestris*. En los años siguientes parte de esas primeras parcelas fueron reinventariadas, a la vez que la red fue ampliándose a distintas especies, como *Quercus robur*, *Betula alba*, *Pseudotsuga menziesii* (ampliando en este caso un estudio parcial iniciado en 1994) y *Pinus pinaster*. Además, se diversificó la red incluyendo otras temáticas relacionadas, principalmente ensayos de claras (a partir del año 2003), pero también tratamientos de fertilización, plantaciones de turno corto, etc., estudios en los que se analizaron aspectos parciales del crecimiento de algunas de las especies anteriores y de otras, como *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, etc.

Este dispositivo experimental de la UXFS se diseñó siguiendo el ejemplo de la red de parcelas de crecimiento y producción que el antiguo Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE), hoy Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), comenzó a instalar en los años 60 del pasado siglo en rodales de diferentes especies por toda España. Así, se trató de establecer un número suficiente de parcelas que permitiese representar adecuadamente las posibles combinaciones de edad, calidad de estación y densidad existentes en los rodales puros y regulares de las diferentes especies a estudiar por toda su área de distribución en Galicia. Además, dichas parcelas se diseñaron como permanentes para que pudieran ser remedidas si fuese necesario y posible.

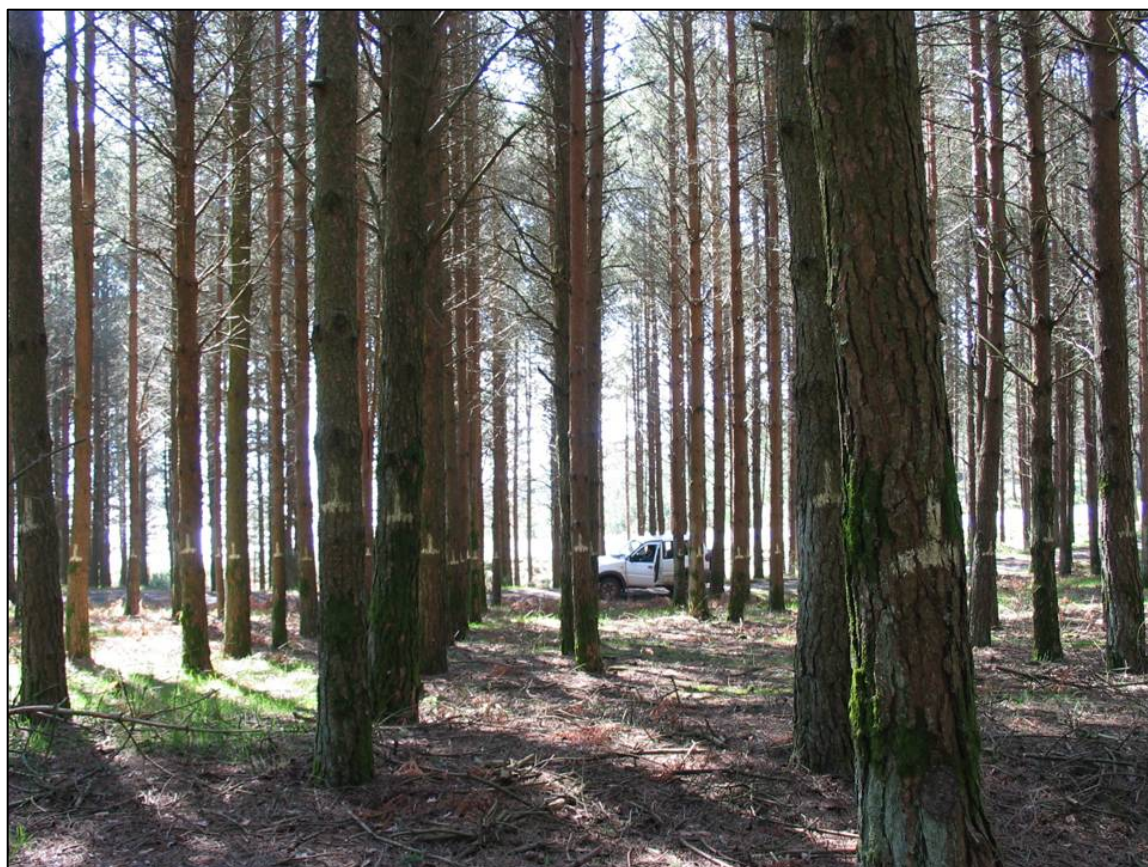


Figura 1.4. Parcela de investigación instalada por la UXFS en un rodal de *Pinus sylvestris* en Navia de Suarna (Lugo).

La información recogida en los primeros inventarios de la red de parcelas de crecimiento de cada especie (apeando y midiendo también árboles dominantes y de otras clases sociológicas) permitió contar, en un plazo de tiempo relativamente reducido, con datos muy interesantes para iniciar el estudio del crecimiento y la producción de varias especies (Rojo et al., 2004). A partir de esa información fue posible elaborar unas primeras herramientas selvícolas (curvas de calidad de estación, tarifas de cubicación con y sin clasificación de productos, tablas de producción de selvicultura media observada, diagramas de manejo de la densidad, etc.), que en algunos casos representaron los primeros trabajos de este tipo realizados en Galicia, e incluso en España, para algunas de las especies estudiadas.

Sin embargo, en la información que proporcionan las parcelas medidas en una única ocasión no se incluye, lógicamente, el crecimiento de las variables dendrométricas y dasométricas, por lo que con esos datos no es posible utilizar determinadas técnicas de ajuste estadístico que resultan muy efectivas y prácticas si se dispone de datos de crecimiento. Por tanto, a partir de los datos de un único inventario sólo es posible la elaboración de modelos estáticos, como son las mencionadas tablas de producción de selvicultura media observada (que reflejan únicamente un número limitado de evoluciones de la densidad) o los diagramas de manejo de la densidad (ver capítulo 3).

La realización de un segundo inventario de parte de las parcelas de crecimiento inicialmente instaladas, que pasarían entonces a denominarse parcelas de intervalo según Gadow et al. (1999), permitió disponer de datos reales de crecimiento, lo que posibilitó el desarrollo de modelos dinámicos, más realistas que los anteriores.

El número de parcelas inventariadas en dos ocasiones se redujo con respecto a las inicialmente instaladas, debido a tres causas:

- ✓ La información que proporcionan dos inventarios de una misma parcela es de mucha mayor utilidad para la modelización del crecimiento que la de un inventario en dos diferentes parcelas, por lo que no es estrictamente necesario remedir todas las parcelas.
- ✓ El mantenimiento de todas las parcelas inventariadas en la primera ocasión supone un elevado coste.
- ✓ Algunas parcelas se pierden con el paso de los años por diferentes causas: incendios, plagas, enfermedades, cortas, etc.

Por tanto, se procuró seleccionar y reinventariar un mínimo de entre 30 y 50 parcelas por especie, bien repartidas por edades, calidades y densidades, de las cuales se conociese perfectamente su historial de tratamientos, aunque siempre que fue posible se trató de aumentar ese número en los reinventarios realizados.

La periodicidad entre mediciones depende del ritmo de crecimiento de cada especie, por lo que pareció conveniente, con el objeto de absorber las condiciones climáticas anormales que pueden ocurrir en determinados años, considerar intervalos de al menos tres años en especies de

crecimiento medio-rápido, como *Pinus radiata*, y al menos cinco años para el resto de las especies (Gadow et al., 1999).

Con los datos del segundo inventario de parte de las parcelas de crecimiento de *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris* fue posible, por tanto, desarrollar los mencionados modelos dinámicos de crecimiento y producción forestal, más flexibles y útiles para la gestión. Dichos modelos permiten simular un rango de alternativas selvícolas mucho mayor que las tablas de producción clásicas, y su utilización por parte de los selvicultores, gestores forestales y otros potenciales usuarios resulta especialmente sencillo gracias a su implementación en el programa informático GesMO® 2009, que se incluye en el CD-ROM que acompaña a este libro.

Recientemente se ha llevado a cabo el tercer inventario de una parte de las parcelas de crecimiento de *Pinus radiata*, gracias a lo cual se ha podido actualizar y mejorar el primer modelo dinámico desarrollado para la especie.

Es importante señalar que las parcelas de crecimiento de este tipo de redes suelen ser parcelas de inventario “pasivo”, en las que la gestión es ajena al equipo investigador y en las que se hace un seguimiento simple, sin provocar de forma controlada modificaciones en el sistema (claras u otros tratamientos), lo que hace difícil cuantificar la respuesta del sistema a dichas actuaciones. Por esta razón, resulta imprescindible efectuar mediciones inmediatamente antes y después de cualquier corta o tratamiento selvícola, lo que no siempre resulta posible.

Un complemento ideal de las redes de parcelas de crecimiento son, por tanto, los ensayos de tratamientos (de claras, de enmiendas o fertilizaciones, de espaciamentos, etc.), que suponen la posibilidad de estudiar la respuesta de los rodales a determinados tratamientos que se aplican bajo la dirección del grupo de investigación que instala los ensayos. Se fijan en este caso todas las variables excepto aquellas que precisamente se pretenden ensayar. A este tipo de experiencias corresponden los sitios de ensayo de claras de diferentes especies que la UXFS comenzó a instalar en el año 2003, de los que se está realizando un seguimiento a largo plazo para obtener la máxima información posible, dados las grandes dimensiones de los sitios y sus elevados costes de instalación (García, 1994).

Actualmente la UXFS tiene instalados y estudia seis ensayos de claras en Galicia: dos en plantaciones de *Pinus radiata*, otros dos en masas de *Pinus pinaster* procedentes de regeneración natural, uno en una plantación de *Pinus sylvestris* y el último en una plantación de *Pseudotsuga menziesii*. Cada uno de los sitios de ensayo consta de un número variable de parcelas (de tamaño también diferente según la densidad inicial y la superficie disponible), en las que se ensayan tres o cuatro tratamientos (claras de distinto tipo y peso, más un testigo), generalmente con repeticiones en bloques aleatorios. Como la instalación de estos focos ha sido relativamente reciente, sólo se ha realizado hasta el momento la primera clara en cada uno de ellos, por lo que todavía no se han podido conseguir resultados definitivos.

El objetivo principal de los ensayos de claras es determinar el tratamiento selvícola más adecuado para cada especie. Para eso, se inventarían periódicamente todas las parcelas con la finalidad de estudiar, por especies, el intervalo de área basimétrica óptima con el que se consigue el máximo productivo (Assmann, 1970), la relación de los diferentes tratamientos con el

crecimiento, la biomasa y la captura de carbono, la dinámica de los rodales mediante índices de competencia determinados antes y después de las claras, así como otros aspectos diversos, como la influencia de los tratamientos en la humedad de los combustibles y su variación intra- e inter-anual, o en el estado sanitario de los rodales.

Además de las parcelas de crecimiento y de las de ensayo de claras, la UXFS ha instalado o medido durante todos estos años otras muchas parcelas, y ha aprovechado cortas realizadas o gestionadas por los servicios forestales de la Xunta de Galicia para obtener información complementaria a la conseguida en la red, o específica para la realización de diversos estudios: ensayos de fertilización con cenizas, cuantificación de la biomasa arbórea, elaboración de tarifas de cubicación con clasificación de productos, etc.

A continuación se describe la composición de la red de parcelas permanentes de la UXFS para las especies estudiadas, distinguiendo entre parcelas de crecimiento y parcelas de ensayo de claras. Como ya se ha comentado, esta red ha sido la fuente principal de información, pero no la única, que se ha utilizado para desarrollar las herramientas selvícolas que se presentan en este libro, por lo que en cada capítulo se hace referencia al dispositivo experimental utilizado para elaborar la herramienta selvícola correspondiente, que en ocasiones ha sido la suma de diversas fuentes de datos.

1.2.1. La red de parcelas permanentes de crecimiento

Actualmente, la UXFS cuenta con una red de parcelas de crecimiento para cada una de las siguientes especies (ordenadas cronológicamente según la fecha en que se instalaron): *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Betula alba*, *Quercus robur*, *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus pinaster*. Todas las parcelas se encuentran en Galicia, salvo una parte de las de *Pseudotsuga menziesii*.

Para la instalación y medición de las parcelas de crecimiento de esta red se siguió la metodología utilizada por Madrigal et al. (1992) para la elaboración de las tablas de producción del haya en Navarra, que a su vez se basaron en las pautas establecidas por la *Forestry Commission* británica (Hummel et al., 1959).

Las parcelas son de forma cuadrada o rectangular y de tamaño variable, con superficies que oscilan entre 625 y 1.200 m² (excepcionalmente algunas parcelas de *Betula alba* son de menor superficie). Siempre que fue posible su lado menor se replanteó siguiendo la línea de máxima pendiente, evitando que sus límites se expusieran a situaciones de borde de masa. La superficie de las parcelas fue en cada caso la necesaria para que incluyera un mínimo de 30 pies, con el fin de poder obtener una estimación fiable de las variables de rodal.

El replanteo de las parcelas se llevó a cabo con cinta métrica, escuadra óptica y jalones, midiéndose posteriormente la pendiente con un hipsómetro Blume-Leiss, y la exposición y la altitud con la ayuda de planos topográficos a escala 1:5.000 ó 1:10.000. En cada localización se tomaron, además, datos de edad y diferentes factores relacionados con la vegetación y el estado fitosanitario del rodal.

Una vez hecho el replanteo, se pasó a realizar el inventario diamétrico, para lo que se marcaron e identificaron previamente todos los pies de diámetro superior a 5 cm (árboles mayores o inventariables), pintando una T invertida a la altura normal (1,30 m sobre el nivel del suelo medidos desde la parte superior de la ladera) y su número de orden en la parcela. En ocasiones se sustituyó el número pintado en los árboles por una chapa de aluminio numerada, que se clavó por encima de la altura normal. Estas chapas, de $4,3 \times 2,7$ cm, poseen unos ganchos y unas perforaciones (figura 1.5) con las que es posible fijarlas al árbol mediante una punta de acero inoxidable (o de aluminio) de unos 6 cm, que se introduce parcialmente en el tronco, para que la chapa se pueda deslizar por el clavo, impidiendo que quede embutida por el crecimiento del árbol. En posteriores inventarios debe tenerse la precaución de corregir, si es necesario, la posición de la punta, que puede tener tendencia a quedar embutida en el tronco si se introdujo demasiado, o a ser expulsada al exterior si ocurrió lo contrario.



Figura 1.5. Chapa de aluminio numerada colocada a la altura normal de un árbol dentro de una de las parcelas de crecimiento de la UXFS.

En la instalación de las últimas parcelas las chapas numeradas se colocaron directamente a la altura normal (1,30 m), y en la posición exacta donde deben medirse los diámetros, asegurando así que en posteriores inventarios o controles se posicione la forcípula en el mismo punto del tronco y que las mediciones sean comparables. Con este sistema se evita tener que pintar el número de cada árbol (lo cual implica quitar parte de la corteza en pinos, pues de lo contrario la marca desaparece en poco tiempo por descamación de la corteza) y la clásica T invertida a la

altura normal. Comparando este sistema de numeración con el clásico de chaspeo de la corteza y uso de pintura se consiguen rendimientos muy superiores, aproximadamente tres veces mayores (Madrigal et al., 1999). Otra ventaja de la numeración con chapas es su mayor duración frente a la pintura, sobre todo en climas muy húmedos.

Una vez numerados todos los árboles de la parcela se realizaron dos mediciones perpendiculares del diámetro normal, utilizando una forcípula con graduación milimétrica y siguiendo las direcciones de los lados de la parcela (figura 1.6).

Asimismo, se midió con hipsómetro (inicialmente Blume-Leiss y últimamente Vertex) la altura total de 30 árboles elegidos aleatoriamente en cada parcela, y de la proporción, en función de la superficie de la misma, de los 100 pies más gruesos por hectárea con aspecto de dominantes, aunque en la instalación de las últimas parcelas, y en los reinventarios, se está midiendo la altura total de todos los árboles. También se midió el espesor de corteza con calibrador de graduación milimétrica en la muestra de árboles elegidos para la medición de la altura. Se anotaron además variables descriptivas de cada árbol, por ejemplo si estaban vivos o muertos, o si presentaban alguna deformación y de qué tipo. La edad, en caso de no conocer la fecha de plantación, se estimó tomando muestras en la base de dos o tres árboles con una barrena de Pressler y contando los anillos de crecimiento (figura 1.6).



Figura 1.6. Medición del diámetro normal con forcípula (izquierda) y detalle del canutillo de madera extraído con una barrena de Pressler para el conteo del número de anillos de crecimiento (derecha).

Por último, y debido a que es necesario conocer la evolución temporal de la altura dominante para la construcción de curvas de calidad de estación que reflejen la productividad forestal (ver capítulo 2), siempre que fue posible se llevó a cabo el análisis de tronco de dos pies dominantes en las proximidades de cada parcela. Esos dos árboles se seleccionaron buscando que su diámetro normal y altura total no difirieran más del 5% respecto al diámetro y altura dominantes

calculados para la parcela correspondiente, y posteriormente se cortaron, trocearon y midieron, siguiendo la metodología expuesta por Madrigal et al. (1999). Esta técnica es la recomendada cuando se carece de información sobre la altura dominante de rodales inventariados previamente, ya que permite disponer en un tiempo muy reducido de datos adecuados para la construcción de curvas de calidad de estación, por lo que fue la utilizada para la práctica totalidad de las especies estudiadas; sólo en el caso de las parcelas gallegas de *Pseudotsuga menziesii* se midieron por escalada los árboles muestra.

A continuación se describe la red de parcelas de crecimiento de cada una de las especies estudiadas por la UXFS.

Pinus radiata

La primera red de parcelas establecida por la UXFS para elaborar modelos forestales de crecimiento fue la de *Pinus radiata*, que empezó a instalarse en el invierno de 1995-96, y llegó a constar de 223 parcelas. Además, se realizaron análisis de troncos en 164 árboles dominantes, cortados en las proximidades de las parcelas, y se apearon y midieron por trozas otros 257 árboles tipo en claras o cortas finales a lo largo de toda la zona de distribución de la especie en Galicia.

Con parte de los datos de ese primer inventario se realizó una tesis doctoral (Sánchez, 2001), en la que se elaboró una primera herramienta de gestión sencilla, inexistente hasta entonces para las plantaciones de pino insigne de Galicia, como son las tablas de producción de selvicultura media observada (Sánchez et al., 2003).

Al transcurrir un tiempo suficiente desde el primer inventario se planteó la necesidad de una nueva medición de las parcelas inicialmente instaladas, esta vez en un número más reducido por las razones antes expuestas. Finalmente se reinventariaron, en el invierno de 1998-99, 155 parcelas. Por los mismos motivos, se realizó un tercer inventario de 56 de estas parcelas en el invierno de 2004-05. Además, entre los tres inventarios 22 parcelas fueron clareadas por lo bajo débil o moderadamente, por lo que fueron medidas justo antes y después de la realización de la clara.

La red de parcelas de crecimiento de *Pinus radiata* remedida representa fielmente las distintas calidades de estación, edades y evoluciones de la densidad que se pueden encontrar en Galicia, si bien las masas maduras de buena calidad están menos representadas, circunstancia por otra parte común en la mayoría de los trabajos de crecimiento y producción.

Con los datos del segundo inventario de la red de parcelas de pino insigne se realizó una nueva tesis doctoral (Castedo-Dorado, 2004), en la que se desarrolló el primer modelo dinámico para la especie en Galicia, que posteriormente ha sido actualizado con la información del tercer inventario de la red (Castedo-Dorado et al., 2007a).

Además, en el tercer inventario se midieron con una estación total las coordenadas de todos los árboles en una submuestra de 44 parcelas, así como la altura de la base de la copa viva (definida como la altura a la que se encuentra la inserción en el tronco del primer verticilo que contiene acículas vivas y forma parte de la copa como un conjunto) y dos diámetros

perpendiculares de la copa (medidos siempre según las direcciones de los lados de las parcelas) en los 30 árboles elegidos aleatoriamente en cada parcela en los que se había medido la altura. De esta manera se consiguió información espacial para el cálculo de índices de competencia dependientes de la distancia entre pies, lo que ha permitido, junto con los datos de los tres inventarios de la red de parcelas de la especie, realizar otra tesis doctoral (Crecente-Campo, 2008) que incluye el primer modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* en Galicia.

Pinus sylvestris

La segunda red de parcelas de crecimiento establecida por la UXFS fue la de *Pinus sylvestris*. Empezó a instalarse en el invierno de 1996-97, y llegó a contar para el primer inventario con 155 parcelas. Con los datos de esa primera medición se elaboró la tesis doctoral de Martínez-Chamorro (2004), en la que se incluyeron las primeras tablas de producción de selvicultura media observada para las plantaciones gallegas de la especie.

En el invierno de 2002-2003 se llevó a cabo el segundo inventario de la red de *Pinus sylvestris*, pero esta vez, y por los motivos antes aludidos, sólo se remidieron 79 de las 155 parcelas establecidas originalmente. Con los datos de 68 de esas parcelas medidas en dos ocasiones fue posible elaborar el primer modelo dinámico de crecimiento para las plantaciones de *Pinus sylvestris* en Galicia, como resultado de otra tesis doctoral (Diéguez-Aranda, 2004; Diéguez-Aranda et al., 2006a).

Betula alba

En el invierno de 1998-99 se instaló la red de parcelas de crecimiento de *Betula alba* de la UXFS. De las 125 parcelas inventariadas, 34 correspondieron a repoblaciones y 91 a rodales naturales. Con esos datos se elaboró un sencillo modelo de crecimiento, consistente en unas tablas de producción de selvicultura media observada (Rojo et al., 2005a), primero para la especie en toda España. Además, con esa información se realizó una tesis doctoral sobre distribuciones diamétricas (Gorgoso, 2003).

En la actualidad se está procediendo al segundo inventario de parte de las parcelas de abedul, con cuyos datos se podrá ya construir un modelo dinámico.

Quercus robur

La UXFS colaboró con otro grupo de investigación de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de Lugo en la instalación de la red de parcelas de crecimiento de *Quercus robur* en Galicia, trabajos que se llevaron a cabo durante el invierno de 2000-01 y que supusieron la medición de un total de 172 parcelas, todas en rodales naturales. En este caso no fue siempre posible cortar y medir árboles dominantes en las proximidades de todas las parcelas, por lo que sólo se determinó la edad en 94 de ellas.

Los datos del primer inventario de esta red dieron lugar a la tesis doctoral de Barrio-Anta (2003), en la que se elaboraron las primeras tablas de producción de selvicultura media observada y los primeros diagramas de manejo de la densidad para la especie en España.

Actualmente se está remidiendo parte de la red para obtener la información necesaria que permita construir un modelo dinámico para *Quercus robur* en Galicia.

Pseudotsuga menziesii

La UXFS también posee una red de parcelas de crecimiento en rodales de *Pseudotsuga menziesii*, siendo éste el único caso en el que existen varias parcelas fuera de Galicia, pues hay instaladas 13 en Asturias, 7 en Cantabria, 12 en Burgos, 30 en La Rioja y 23 en Guipúzcoa, además de 25 en las provincias gallegas.

Para el establecimiento de la red de parcelas de *Pseudotsuga menziesii* se aprovecharon algunas mediciones realizadas para un estudio parcial del año 1994, que se ampliaron durante el período 2000 a 2005.

Con los datos de estas parcelas y con los de otra red de 54 parcelas temporales instaladas en Girona en 1996 y 1997 por el Departamento de Producción Vegetal y Ciencia Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria de Lleida, se ha elaborado otra tesis doctoral que incluye los primeros modelos estáticos de crecimiento para la especie en España (López-Sánchez, 2009).

Pinus pinaster

En 2005 se inició la instalación y medición de la última red de parcelas de crecimiento de la UXFS, que corresponde a la especie *Pinus pinaster* y consta de 28 parcelas, establecidas en rodales regulares situados principalmente en las provincias de Lugo y Ourense. En dichas parcelas, además de las mediciones antes reseñadas, también se determinaron las coordenadas de cada árbol mediante una estación total topográfica, con el fin de analizar la estructura de los rodales y la competencia entre los pies en función de la distancia que los separa.

Con los datos procedentes de estas parcelas todavía no se ha desarrollado ningún modelo que se pueda considerar definitivo, por lo que la mayoría de las herramientas selvícolas que se presentan en este libro para la especie se basan en los datos tomados en dispositivos experimentales de otras instituciones.

En la tabla 1.1 se muestran los estadísticos descriptivos de las principales variables medidas en cada uno de los inventarios de la red de parcelas de crecimiento instalada en Galicia por la UXFS para las especies antes mencionadas.

1.2.2. La red de sitios de ensayo de claras

Como complemento a la red de parcelas de crecimiento, la UXFS comenzó a instalar en el año 2003 una serie de sitios de ensayo permanentes de claras para las principales especies forestales de Galicia. Como ya se ha comentado, hoy en día se cuenta con seis sitios de ensayo

en rodales de coníferas: dos en plantaciones de *Pinus radiata*, otros dos en rodales naturales de *Pinus pinaster*, uno en una plantación de *Pinus sylvestris* y el último en una plantación de *Pseudotsuga menziesii*. Hasta el momento, y debido al escaso tiempo transcurrido desde la instalación de los ensayos, únicamente se ha realizado la primera clara en cada uno de ellos, por lo que sólo se han podido obtener resultados parciales (Crecente Campo et al., 2008).

El establecimiento de esta red constituye una oportunidad única para, además de estudiar los regímenes de clara más adecuados, analizar la influencia de las mismas en el funcionamiento de los sistemas forestales (por ejemplo, en el riesgo de incendios y en la sanidad de las masas).

Tabla 1.1. Datos y principales variables de la red de parcelas permanentes de la UXFS para el estudio de modelos de crecimiento forestal.

Especie	<i>Pinus radiata</i>			<i>Pinus sylvestris</i>		<i>Betula alba</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Pinus pinaster</i>	
Inventario	1º	2º	3º	1º	2º	1º	1º	1º	1º	
Nº de parcelas	223	155	56	155	68	125	172 ⁽¹⁾	110 ⁽²⁾	28	
Año del inventario	1995/96	1998/99	2004/05	1996/97	2002/03	1998/99	2000/01	1994; 2000-05	2005	
<i>N</i>	Media	970	832	745	1.433	1.247	1.793	874	942	802
	Máximo	2.048	1.968	1.488	2.720	2.112	6.000	3.022	2.128	2.000
	Mínimo	192	183	280	600	580	390	302	280	270
	Desv. típica	507	434	308	426	340	1.134	482	384	365
<i>t</i>	Media	22,4	25,1	30,5	32,7	39,7	30,1	70,0	28,0	25
	Máximo	38	41	47	48	55	60	155	63	45
	Mínimo	5	8	20	12	21	12	34	8	18
	Desv. típica	8,2	8,0	7,4	7,8	7,8	9,4	25,0	9,2	8,0
<i>H</i> ₀	Media	19,6	21,8	26,6	12,1	15,5	15,0	17,0	19,3	19,3
	Máximo	32,7	34,0	35,2	22,6	24,0	23,8	25,6	34,4	27,7
	Mínimo	9,1	12,1	17,8	4,0	9,0	7,2	7,2	6,5	14,2
	Desv. típica	5,4	4,9	4,2	4,3	3,9	3,6	3,3	5,5	3,3
<i>G</i>	Media	32,6	36,3	44,1	34,3	44,6	24,6	28,3	35,0	48,2
	Máximo	59,8	70,6	64,0	74,2	72,6	66,5	72,9	68,7	83,2
	Mínimo	11,4	16,5	28,4	4,2	16,2	3,3	3,4	4,4	24,4
	Desv. típica	10,3	9,7	7,9	14,4	11,3	10,7	9,2	13,0	15,1

Nota: *N* = número de pies por hectárea; *t* = edad (años); *H₀* = altura dominante (años, ver apartado 2.1.6 y anexo I); *G* = área basimétrica (m²/ha). ¹ Los datos de edad corresponden a las 94 parcelas en las que se pudieron cortar árboles. ² Sólo se incluyen los datos correspondientes a la red de 110 parcelas de la UXFS.

Los procedimientos de instalación y primer inventario de estas parcelas fueron muy similares a lo comentado para las parcelas de crecimiento. Se numeraron todos los árboles con chapas metálicas y se midieron los diámetros normales (a 1,30 m del suelo), así como la altura total y de la copa en una muestra representativa de los pies. En algunos casos también se midió la biomasa de diferentes fracciones del árbol (ver capítulo 10) en otra muestra de pies repartida por todo el rodal en el que se estableció el sitio de ensayo. Como novedad, se determinó la posición exacta

de todos los árboles dentro de las parcelas, midiendo sus coordenadas con una estación total topográfica (figura 1.7).

A continuación se describe la red de sitios de ensayo de claras de la UXFS, siguiendo un orden cronológico según la fecha de instalación para cada especie estudiada.

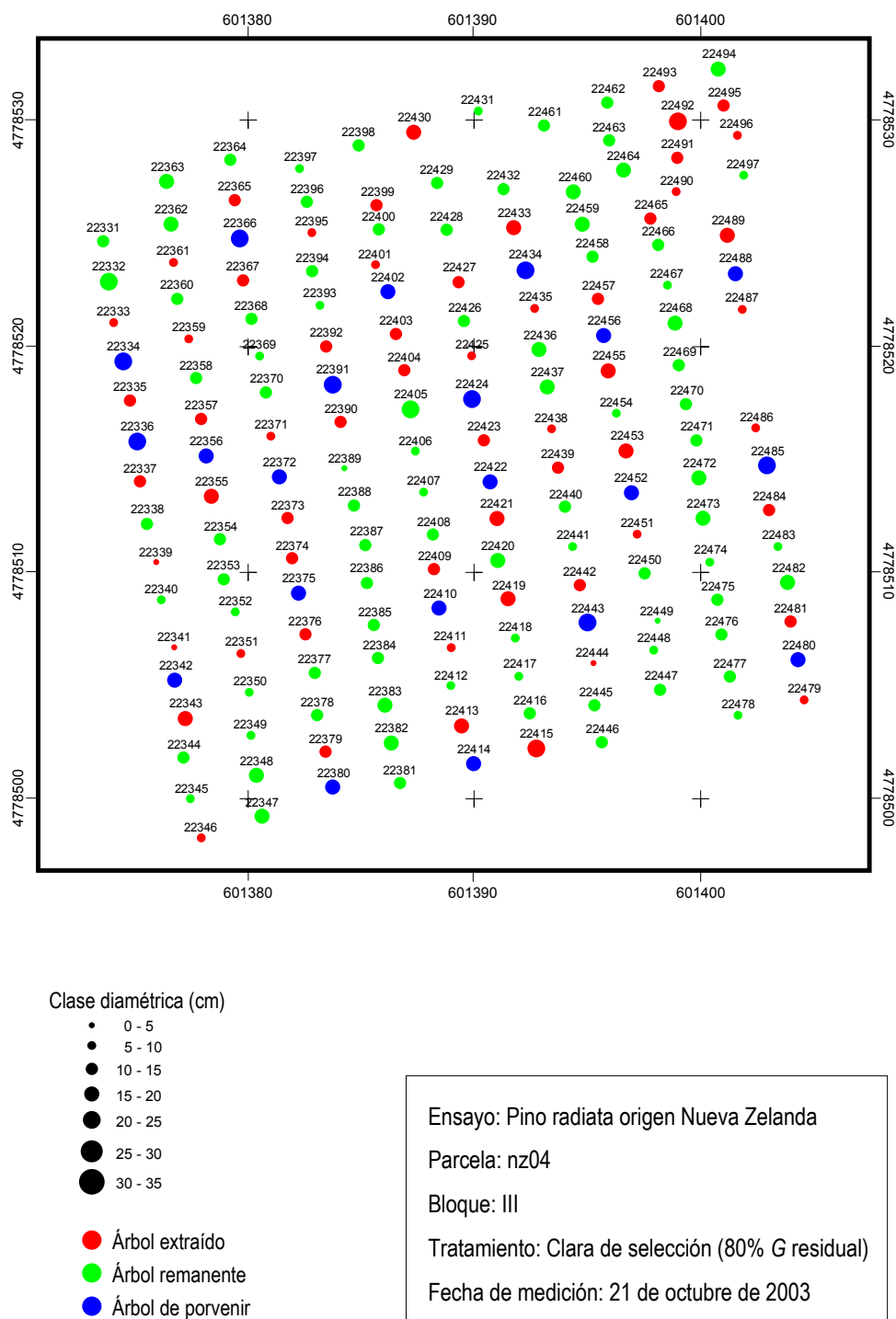


Figura 1.7. Esquema de la situación de los árboles dentro de una de las parcelas del ensayo de claras de *Pinus radiata* de Begonte (Lugo).

Pinus radiata

El primer ensayo de claras establecido por la UXFS fue instalado en el año 2003 en una plantación de *Pinus radiata* del municipio de Begonte (Lugo). Realmente este sitio consta de dos ensayos diferentes, puesto que, aunque no estaba así previsto, en la búsqueda de lugares adecuados para instalar las parcelas (que fue una de las tareas más complicadas, por las necesidades de homogeneidad de la masa y mínimo superficial) se localizó este monte poblado por *Pinus radiata*, que contaba con dos rodales contiguos repoblados el mismo año y con los mismos procedimientos, pero que se diferenciaban en el origen de la semilla (neozelandesa y gallega), por lo que se decidió aprovechar esa rara y valiosa situación duplicando el ensayo previsto para pino insigne, con el objeto de buscar posibles diferencias entre ambas procedencias.



Figura 1.8. Aspecto de una parcela del ensayo de claras de *Pinus radiata* de Begonte (Lugo).

Así, este foco cuenta con 24 parcelas de 30×30 m, correspondientes a cuatro tratamientos repetidos en tres ocasiones (distribuidos en bloques aleatorios) por cada uno de los dos orígenes de semilla (Galicia y Nueva Zelanda). Los cuatro tratamientos ensayados en este foco son: control o testigo, una clara baja débil dejando un 90% del área basimétrica residual respecto al control, una clara baja fuerte dejando un 80% del área basimétrica residual, y una clara de selección de aproximadamente 250 árboles de porvenir por hectárea, extrayendo los pies que compiten directamente con ellos, independientemente de su tamaño, hasta alcanzar un 80% del área basimétrica residual. La primera y única clara realizada hasta el momento se ejecutó en 2004, cuando el rodal tenía una edad de 12 años y una densidad media de 1.670 pies/ha. En este foco

se han realizado ya tres inventarios (2003, 2005 y 2007). Toda la información y los primeros resultados de este sitio de ensayo han sido recogidos en diversos trabajos de investigación de la titulación de Ingeniería de Montes presentados en la EPS de Lugo, de la USC (Crecente-Campo, 2004; Ron, 2005; Martínez, 2006; Pereira, 2006) y en Rojo et al. (2005b).

Pinus pinaster

El siguiente sitio de ensayo de claras instalado por la UXFS fue establecido en un rodal de regeneración natural tras incendio de *Pinus pinaster* en Punxín (Carballiño, Ourense), localizado en la zona costera definida por Vega Alonso et al. (1993a) para la especie en Galicia (ver apartado 1.3 y figura 1.13). En este caso se instalaron 12 parcelas de 25×25 m, que corresponden a cuatro tratamientos repetidos en tres ocasiones (distribuidos en bloques aleatorios). Los tratamientos ensayados en este foco fueron muy similares a los anteriores: un control, una clara baja débil dejando un 75% del área basimétrica residual, una clara baja fuerte dejando un 60% del área basimétrica residual, y una clara de selección de aproximadamente 450 pies de porvenir por hectárea, con la misma filosofía que se ha descrito anteriormente, pero hasta alcanzar un 75% del área basimétrica residual. La clara se ejecutó en marzo de 2004, cuando la masa tenía una edad de 13 años y una densidad media de 3.750 pies/ha, y hasta el momento se han realizado dos inventarios (2004 y 2007). La información recogida en este foco ha quedado reflejada en un trabajo de investigación de la titulación de Ingeniería de Montes presentado en la EPS de Lugo (Hernández, 2005) y en el trabajo de Crecente-Campo et al. (2005).

Debido a que, por su localización, el rodal de *Pinus pinaster* del ensayo anterior corresponde a la zona costera, pareció conveniente instalar otro foco de ensayo de claras en un rodal de la misma especie pero de la zona interior, para poder así obtener información referida a las claras en las dos zonas definidas por Vega Alonso et al. (1993a) para este pino en Galicia (ver apartado 1.3 y figura 1.13). Así, en 2008 se ha establecido un nuevo ensayo de claras en un rodal de regeneración natural de *Pinus pinaster* en la zona interior, en O Corgo (Lugo). Este foco está formado únicamente por cuatro parcelas, correspondientes a cuatro tratamientos sin repeticiones: un control, una clara baja débil dejando un 65% del área basimétrica residual respecto al control, una clara baja fuerte dejando un 52% del área basimétrica residual y una clara de selección de 136 árboles de porvenir por hectárea, en la que se ha reducido el área basimétrica hasta un 78% de la correspondiente al control. La decisión de establecer un diseño más sencillo, sin realizar bloques aleatorios de parcelas en los que se repitan los tratamientos, se ha debido a los resultados obtenidos a partir de la información recabada en algunos de los ensayos anteriores, que recomendaron análisis por árboles individuales en vez de por valores medios de la masa (Martínez, 2006; Pereira, 2006; Crecente-Campo et al., 2008), por lo que, en ese caso, no resulta imprescindible repetir los tratamientos en diferentes parcelas si se cuenta con un número suficiente de árboles en cada una de ellas. La clara en este ensayo se ha ejecutado en 2008, teniendo las parcelas una edad de 23 años y una densidad media de 2.006 pies/ha, y de momento sólo se cuenta con un inventario (en ese mismo año 2008). Los datos de este foco han quedado

recogidos en un trabajo de investigación de la titulación de Ingeniería Técnica Forestal presentado en la EPS de Lugo (Barreiro, 2009).

Pseudotsuga menziesii

También se ha instalado un sitio de ensayo de claras en una plantación de *Pseudotsuga menziesii* en Bacurín (Lugo). Este foco consta de únicamente ocho parcelas, debido a la pequeña superficie disponible con condiciones adecuadas para el ensayo. En esas parcelas se han ensayado tres tratamientos: dos parcelas corresponden al control, tres parcelas a una clara baja fuerte en la que se ha dejado un 75% del área basimétrica residual respecto al control, y las otras tres a una clara de selección de 122 pies de porvenir por hectárea, similar a la mencionada para las especies anteriores, y en la que se ha dejado un 73% del área basimétrica residual. La clara se ha ejecutado en 2007, cuando la masa tenía 18 años y una densidad media de 1.101 pies/ha, y se cuenta con un único inventario (2006-07). La descripción y el análisis del sitio de ensayo, así como los resultados parciales iniciales, han quedado recogidos en otro trabajo de investigación de la titulación de Ingeniería de Montes presentado en la EPS de Lugo (Preciado, 2008).



Figura 1.9. Trabajos de instalación (izquierda) y aspecto de una parcela del ensayo de claras de *Pseudotsuga menziesii* de Bacurín, Lugo (derecha).

Pinus sylvestris

El último ensayo de claras instalado por la UXFS se ha localizado en una plantación de *Pinus sylvestris* en Becerreá (Lugo), y en él se han incluido solamente cuatro parcelas, sin repeticiones, debido a las causas expuestas anteriormente. Los tratamientos ensayados han sido: un control, una clara baja débil en la que se ha extraído un 17% de su área basimétrica inicial, una clara baja fuerte con una extracción de un 32% de su área basimétrica inicial, y una clara de selección de 68 pies de porvenir por hectárea, en la que se ha cortado un 13% del área

basimétrica inicial de la parcela. La clara se ha ejecutado en 2008, con una edad y una densidad media de la masa de 35 años y 1.040 pies/ha respectivamente, y las parcelas cuentan con un único inventario (invierno de 2007-08).

En Crecente-Campo et al. (2008) se puede encontrar información detallada de las variables dasométricas de cada parcela dentro de cada uno de estos ensayos de claras instalados por la UXFS.

1.3. Modelos de crecimiento desarrollados para Galicia

En este apartado se reseñan los modelos de crecimiento (curvas de calidad de estación, tablas de producción, diagramas de manejo de la densidad, modelos dinámicos de rodal y modelos de árbol individual) desarrollados hasta la fecha para las especies forestales gallegas más importantes, y se recomiendan aquellos de mayor utilidad para la gestión, la mayor parte de los cuales se han incluido en los capítulos correspondientes de este libro (ver capítulos 2, 3, 4 y 5). Para presentar dichos modelos se ha preferido seguir un orden alfabético de las especies según sus nombres científicos, tal como se ha hecho en el resto del libro, por lo que dicho orden no responde a su importancia comercial o superficial en Galicia.

Otras herramientas selvícolas de interés para la gestión forestal (tarifas de cubicación, tarifas de biomasa, relaciones altura-diámetro generalizadas, etc.) se describen igualmente en otros capítulos, indicando también, en cada caso, las más recomendables para su uso hoy en día.

Betula alba

El primer estudio detallado del crecimiento y la producción de abedul en Galicia fue elaborado por Villarino (1983) y dio lugar a su tesis doctoral. A finales del siglo pasado y comienzos del presente se realizaron varios estudios sobre aspectos concretos del crecimiento de la especie (Villarino, 1993; Villarino y Riesco, 1997) y la estructura de sus rodales (Gorgoso, 2003).

En 2005 se publicaron las primeras tablas de producción de silvicultura media observada para la especie en Galicia (Rojo et al., 2005a; disponibles también en Serrada et al., 2008), basadas en la primera medición de la red de 125 parcelas permanentes instaladas por la UXFS, como se ha indicado en apartados anteriores. Un avance metodológico en el proceso de construcción de las curvas de calidad de estación ha permitido mejorar las estimaciones de esta parte de las tablas de producción (Diéguez-Aranda et al., 2006b), que se ha utilizado para elaborar una versión actual de dichas tablas, que se presenta en este libro (capítulo 3). Derivados de los mismos datos que las tablas de producción, se han obtenido también unos diagramas de manejo de la densidad para la especie, que se presentan igualmente en el capítulo 3. Dichos modelos son los recomendados hoy en día para gestionar los rodales regulares de *Betula alba* de Galicia.



Figura 1.10. Plantación de *Betula alba* en Baamonde (Lugo).

En la actualidad se está realizando la segunda medición de la red de parcelas de abedul, por lo que en breve se podrá construir un modelo dinámico, más flexible y práctico, con una estructura similar a la empleada con las especies de pino, y que se describe más adelante.

***Eucalyptus* spp.**

La práctica totalidad de los estudios de crecimiento realizados en Galicia sobre eucaliptos se han realizado, lógicamente, para la especie más abundante: *Eucalyptus globulus*.

Así, ya en 1966 se publicaron las primeras tablas de producción desarrolladas para *Eucalyptus globulus* en el norte de España (Pita, 1966). A pesar de que la muestra original incluía parcelas localizadas en las provincias de A Coruña y Pontevedra, los datos finalmente utilizados para construirlas se basaron en la evolución observada únicamente en 19 parcelas instaladas en la provincia de Santander, por lo que realmente no se pueden considerar unas tablas que mostrasen la situación de esta especie en Galicia.

Los primeros modelos de crecimiento y producción elaborados a partir de datos de rodales de Galicia de *Eucalyptus globulus* fueron las tablas de producción para monte bajo durante los dos primeros turnos de Fernández López (1982). Posteriormente, el mismo autor (Fernández López, 1985) realizaría otras tablas de producción para plantaciones de esta especie con diferentes

espaciamientos (2×2 m; $2,5 \times 2,5$ m; 3×3 m). Dichas tablas están disponibles en la recopilación realizada por Madrigal et al. (1999).



Figura 1.11. Rodal de *Eucalyptus globulus* en Mañón (A Coruña).

Hasta el año 2003 no se desarrolló el primer modelo dinámico de crecimiento para *Eucalyptus globulus* en Galicia (García y Ruiz, 2003), que se construyó empleando datos de una red de 113 parcelas de inventario forestal continuo de la Empresa Nacional de Celulosa (ENCE) instaladas en masas de segundo turno (masas de chirpiales de primera brotación). Este modelo, en opinión de los propios autores, no refleja con precisión la realidad observada en los rodales de monte alto de *Eucalyptus globulus* de Galicia, por lo que en estos casos debe de utilizarse con cautela.

Todos los modelos anteriores están basados en datos de rodales cuya producción final está orientada, mayoritariamente, a la trituración para la fabricación de pasta. El único modelo que permite estimar la producción de madera para sierra para *Eucalyptus globulus* en Galicia es el modelo de árbol individual desarrollado por Nutto y Touza (2004), que partiendo de una relación entre el diámetro normal y el diámetro de la copa permite determinar el espacio que necesita un árbol para alcanzar un cierto diámetro objetivo. Un ejemplo sencillo de aplicación de este modelo se puede encontrar en Nutto y Touza (2006).

En cuanto a *Eucalyptus nitens*, apenas existe información sobre su crecimiento y producción en Galicia, y únicamente puede citarse un trabajo que presenta unos primeros resultados sobre el tema (Lorenzo y Álvarez González, 2000).

Pinus pinaster

Dada la importancia de esta especie en la economía forestal gallega, han sido varios los estudios dirigidos a determinar su capacidad productiva y las condiciones y tratamientos óptimos para garantizarla.



Figura 1.12. Rodal adulto de *Pinus pinaster*.

Las primeras tablas de producción para esta especie en Galicia fueron desarrolladas por Echeverría y De Pedro (1948) para la provincia de Pontevedra, y en ellas se mostraba una silvicultura dirigida exclusivamente a la obtención de pasta de papel. En los años 60 del pasado siglo se iniciaron los estudios sobre la ecología de la especie y, como resultado de los mismos, Nicolás y Gandullo (1967) establecieron una primera relación entre la calidad de estación y factores ambientales y edáficos. Varios años después se realizaron otras tablas de producción de silvicultura media observada (Molina y Ruiz Zorrilla, 1976) a partir de un inventario único de 106 parcelas y de los datos de la red de parcelas del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE). Un estudio posterior de Bará y Toval (1983), basado en una amplia red de parcelas, permitió aumentar la información referente a los factores que influyen sobre la calidad de

estación de esta especie y dio lugar a unas curvas de calidad de estación. Empleando como base la misma red de parcelas se construyeron unas nuevas tablas de producción de selvicultura media observada y de selvicultura de referencia (Madrigal y Martínez Millán, 1992).

El primer modelo dinámico para la especie en Galicia (Rodríguez Soalleiro, 1995; Álvarez González et al., 1999) distinguía dos zonas con pautas de crecimiento diferenciado: la costera y la interior (figura 1.13). La división entre ambas zonas es coincidente con las áreas de mejora de la especie que marcó el Plan de Mejora Genética Forestal de Galicia (Vega Alonso et al., 1993a). La separación entre ellas a efectos de los trabajos de mejora genética se fundamentó en estudios climáticos previos desarrollados en el CIF de Lourizán (Toval y Vega Alonso, 1982). El motivo de la consideración de dos modelos distintos es la diferente pauta de crecimiento de la especie en ambas zonas, derivada tanto de las distintas condiciones climáticas como del diferente origen del material empleado en las repoblaciones, si bien los límites entre las regiones costera e interior no siempre son claros.

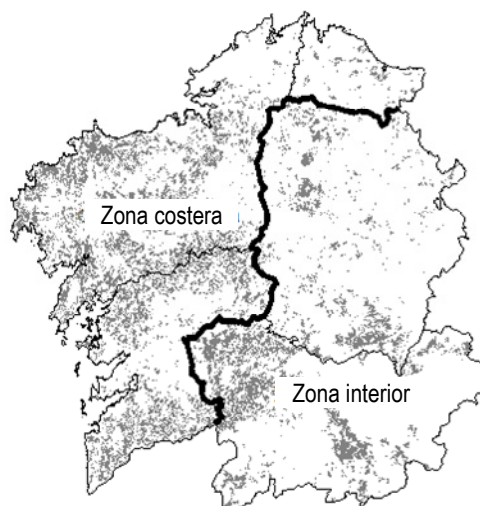


Figura 1.13. Delimitación de las zonas costera e interior para *Pinus pinaster* en Galicia en función de sus diferentes pautas de crecimiento (Vega Alonso et al., 1993a).

Ese modelo dinámico, basado en la amplia red de parcelas instalada en los estudios previos y en varios ensayos de claras del IFIE, se incluyó en un simulador informático denominado PINASTER (Rodríguez Soalleiro et al., 1994) y dio lugar a la tesis doctoral de Rodríguez Soalleiro (1995). A partir del mismo se generaron unas tablas que describen cuatro regímenes selvícolas propuestos por el autor: máxima renta en especie, producción preferente de madera de desintegración, selvicultura multiproducto y selvicultura de plantación a espaciamiento semidefinitivo (Rodríguez Soalleiro, 1995; también disponibles en Madrigal et al., 1999).

Sucesivas mejoras metodológicas han modificado la estructura de ese primer modelo dinámico (Álvarez González et al., 2005; Barrio-Anta et al., 2006a). Su última versión se describe en el capítulo 4 y, además, se ha implementado en el simulador informático de crecimiento GesMO® 2009 que se incluye en el CD-ROM que acompaña a este libro.

Por otra parte, se ha elaborado un diagrama de manejo de la densidad para los rodales de *Pinus pinaster* de Galicia (Barrio-Anta et al., 2006b; también disponible en Serrada et al., 2008), aunque se recomienda utilizar preferentemente el mencionado modelo dinámico para la especie, mucho más flexible y fiable.

Pinus radiata

Las primeras tablas de producción para esta especie con datos de Galicia fueron desarrolladas por Echeverría (1942), incluían varias parcelas en la provincia de Pontevedra, además de muchas otras en las de Guipúzcoa, Santander y Vizcaya, y se enfocaron, como en el caso de las primeras tablas de producción de *Pinus pinaster* antes mencionadas, a la obtención de pasta de papel.

En Galicia, el primer trabajo riguroso centrado en el crecimiento y producción de la especie fue la tesis doctoral de Sánchez (2001), elaborada con los datos de la primera medición de 175 de las 223 parcelas permanentes de la especie instaladas por la UXFS por todo su área de distribución en la región, como se ha comentado anteriormente, y a partir de la cual se derivaron las primeras tablas de producción de silvicultura media observada para el pino radiata en Galicia (Sánchez et al., 2003), que presentaban tres diferentes evoluciones de la densidad (alta, media y baja).

También se ha comentado que, posteriormente, Castedo-Dorado (2004) desarrolló un modelo dinámico de crecimiento para esta especie (primero para las plantaciones de Galicia) que se basa en los datos del segundo inventario de 155 parcelas de la red de la UXFS y en la utilización de variables de estado y de funciones de transición en forma de diferencias algebraicas para proyectar dichas variables. Dicho modelo se implementó en el programa informático GesMO® 1.0 (Castedo-Dorado, 2004), permitiendo así simular cualquier situación posible eligiendo los marcos de plantación y regímenes de clara que interesen, siempre que la evolución propuesta esté representada en las parcelas empleadas para ajustar el mismo. Recientemente, este modelo ha sido revisado, utilizando para ello los datos del tercer inventario de parte de la red original de parcelas y aplicando técnicas estadísticas más avanzadas (Castedo-Dorado et al., 2007a). Esta actualización del modelo dinámico para las plantaciones gallegas de pino insigne (ver capítulo 4), se ha incluido en el simulador de crecimiento y producción de rodales forestales GesMO® 2009 que se presenta en el CD-ROM que se adjunta a este libro.

También se ha elaborado un diagrama de manejo de la densidad para los rodales de *Pinus radiata* de Galicia (Castedo-Dorado et al., 2007b; 2009), pero al igual que ocurría con la especie anterior, se recomienda utilizar preferentemente el modelo dinámico que se acaba de reseñar.

Por último, con la información de las parcelas de la UXFS de esta especie medidas en dos y tres ocasiones se ha elaborado el único modelo de crecimiento de árbol individual existente hasta el momento en Galicia (Creciente-Campo, 2008).

Pinus sylvestris

A partir de los datos del primer inventario de la red de 155 parcelas permanentes instaladas por la UXFS en plantaciones de pino silvestre por toda Galicia, completados con el apeo de 236 árboles dominantes en sus proximidades, se elaboraron unas tablas de producción de selvicultura media observada para dicha especie y región (Martínez-Chamorro, 2004).

Tras la realización del segundo inventario de 68 parcelas seleccionadas del total de 155 de que constaba la red inicial, se construyó un modelo dinámico de crecimiento (Diéguez-Aranda, 2004; Diéguez-Aranda et al., 2006a) con una estructura similar a la empleada para *Pinus radiata* y basado igualmente en la utilización de variables de estado y de funciones de transición en forma de diferencias algebraicas para proyectar dichas variables (ver capítulo 4). Este modelo también se implementó en el simulador de crecimiento GesMO® 1.0 (Diéguez-Aranda, 2004) y está incluido en la versión GesMO® 2009 que se presenta en el CD-ROM que se acompaña con este libro.

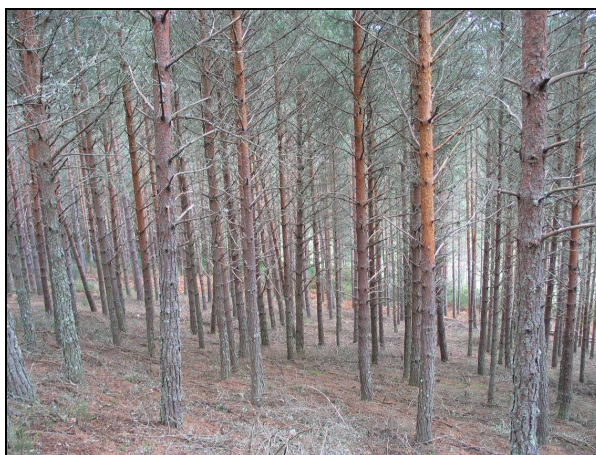


Figura 1.14. Clara sistemática en un rodal de *Pinus sylvestris* (izquierda) y rodal de la misma especie (derecha) en los municipios lucenses de Navia de Suarna y Cervantes, respectivamente.

Puesto que las masas de *Pinus sylvestris* en Galicia son procedentes de repoblación y las primeras plantaciones importantes se llevaron a cabo en la década de los 50 del siglo pasado, las parcelas muestreadas no superaron los 60 años de edad, por lo que tanto las tablas de producción como el modelo dinámico tienen como límite de proyección los 55-60 años. No obstante, las funciones desarrolladas en el modelo dinámico permiten realizar una extrapolación a edades avanzadas con cierta garantía, por lo que dicho modelo podría utilizarse con cautela hasta que no se elabore otro a partir de los datos de un nuevo inventario.

Pseudotsuga menziesii

El primer estudio sobre el crecimiento de esta especie en Galicia fue llevado a cabo por el CIF de Lourizán (Vega Alonso et al., 1993b). Posteriormente, García Sánchez et al. (1996) utilizaron parte de la red de parcelas de la UXFS para elaborar un estudio parcial sobre el crecimiento y la producción de *Pseudotsuga menziesii* en Galicia y Asturias.

Basándose en los datos de toda la red de parcelas de la UXFS y en los de la red del Departamento de Producción Vegetal y Ciencia Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria de Lleida, comentadas anteriormente, se han elaborado unas tablas de producción de selvicultura media observada y un diagrama de manejo de la densidad, que constituyen los primeros modelos estáticos de crecimiento para la especie en España (López-Sánchez, 2009). Estos modelos se presentan en el capítulo 3 de este libro.

***Quercus* spp.**

En Galicia existen varios estudios sobre la ecología y el estado de los rodales de *Quercus robur* (Díaz-Maroto, 1997), *Quercus petraea* (Vila, 2003) y *Quercus pyrenaica* (Fernández-Parajes, 2006), incluyendo los dos últimos unas curvas de calidad de estación, aunque son escasos los estudios dirigidos a la construcción de modelos de crecimiento y producción.



Figura 1.15. Aspecto de un rodal de *Quercus robur* en Palas de Rei, Lugo (izquierda), y trabajos de apeo de un árbol dominante para el estudio de la calidad de estación de la especie (derecha).

En el caso de *Quercus robur*, el trabajo más completo relacionado con modelos de crecimiento es la ya mencionada tesis doctoral de Barrio-Anta (2003), que está basada en el primer inventario de la red de 172 parcelas permanentes de la especie en cuya instalación y

medición colaboró la UXFS. En dicha tesis se presentan unas tablas de producción de selvicultura media para dos regímenes selvícolas diferentes (masas de baja y de alta espesura). Derivado de los mismos datos se han obtenido también unos diagramas de manejo de la densidad (Barrio-Anta y Álvarez González, 2005) que, de forma sencilla, permiten evaluar un mayor número de alternativas de gestión. En el año 2005 se volvieron a ajustar las curvas de calidad de estación (Barrio-Anta y Diéguez-Aranda, 2005), mejorando las estimaciones al emplear una metodología más moderna, por lo que se aconseja el uso de estas nuevas curvas. Además, dichas curvas se han utilizado para actualizar las mencionadas tablas de producción y diagramas de manejo de la densidad, cuyas últimas versiones se presentan en este libro (capítulo 3), pues son los modelos de crecimiento más avanzados que existen hoy en día y, por tanto, los recomendados para la gestión de los rodales gallegos de *Quercus robur*.

En la actualidad se está completando la segunda medición de la red de parcelas permanentes de la especie, por lo que en poco tiempo se podrá contar con un modelo dinámico para *Quercus robur* de similares características a los ya desarrollados para las especies de pino.

1.4. Bibliografía

- Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R., Vega Alonso, G. 1999. Elaboración de un modelo de crecimiento dinámico para rodales regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. 8(2), 319-334.
- Álvarez González, J.G., Ruiz González, A.D., Rodríguez Soalleiro, R., Barrio-Anta, M. 2005. Ecoregional site index models for *Pinus pinaster* in Galicia (northwestern Spain). Ann. For. Sci. 62, 115-127.
- Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study. Ed. Pergamon Press. Oxford.
- Bará, S., Toval, G. 1983. Calidad de estación de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales nº 24, Madrid.
- Barreiro, J.L. 2009. Ensaio de claras nunha masa natural de *Pinus pinaster* Ait. no municipio de O Corgo (Lugo). Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Barrio-Anta, M. 2003. Crecimiento y producción de masas naturales de *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Barrio-Anta, M. Álvarez González, J.G. 2005. Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules. Forestry 78(3), 209-216.
- Barrio-Anta, M., Diéguez-Aranda, U. 2005. Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain). Eur. J. For. Res. 124, 19-28.
- Barrio-Anta, M., Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G., Parresol, B.R., Rodríguez Soalleiro, R. 2006a. Development of a basal area growth system for maritime pine in northwestern Spain using the generalized algebraic difference approach. Can. J. For. Res. 36, 1461-1474.

- Barrio-Anta, M., Balboa-Murias, M.A., Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G. 2006b. An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *For. Ecol. Manage.* 223, 24-34.
- Brodie, J.D., Sessions, J. 1991. The evolution of analytic approaches to spatial harvest scheduling. En: *Proceedings of the 1991 Symposium on Systems Analysis in Forest Resources*. March 3-6, 1991, Charleston, South Carolina, USA.
- Burkhardt, H.E. 2003. Suggestions for choosing an appropriate level for modelling forest stands. En: Amaro, A., Reed, D., Soares, P. (Eds.), *Modelling Forest Systems*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 3-10.
- Castedo-Dorado, F. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Simulación de alternativas selvícolas con inclusión del riesgo de incendio. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G. 2007a. A growth model for *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. *Ann. For. Sci.* 64, 453-465.
- Castedo-Dorado, F., Álvarez-Álvarez, P., Crecente-Campo, F., Barrio-Anta, M. 2007b. Consideración de la estabilidad de la masa en diagramas de manejo de la densidad. *Cuadernos de la SECF* 23, 63-74.
- Castedo-Dorado, F., Crecente-Campo, F., Álvarez-Álvarez, P., Barrio-Anta, M. 2009. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry* 82, 1-16.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H., Bailey, R.L. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. Krieger Publishing Company, New York.
- Crecente-Campo, F. 2004. Ensayo de claras en una repoblación de *Pinus radiata* D. Don en el municipio de Begonte (Lugo). Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Crecente-Campo, F. 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Crecente-Campo, F., Ferreiro-Abelairas, H., Barrio-Anta, M., Rojo, A. 2005. Ensayo de aplicación de claras de selección en *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. IV Congreso Forestal Español. Zaragoza, 26-30 septiembre 2005.
- Crecente-Campo, F., Rojo, A., Álvarez González, J.G. 2008. III Xornada de difusión de resultados de investigación. FORESGAL, 28 marzo 2008, Lugo. Subdirección Xeral de Montes e Industrias Forestais. Consellería do Medio Rural.
- Davis, L.S., Johnson, K.N., Bettinger, P.S., Howard, T.E. 2001. *Forest management: to sustain ecological, economic and social values*. McGraw-Hill Series in Forest Resources, New York.
- Díaz-Maroto, I.J. 1997. Estudio ecológico y dasométrico de las masas de carballo (*Quercus robur* L.) en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Diéguez-Aranda, U. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Diéguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F., Álvarez González, J.G., Rojo, A. 2006a. Dynamic growth model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia (north-western Spain). *Ecological Modelling* 191(2), 225-242.
- Diéguez-Aranda, U., Grandas-Arias, J.A., Álvarez González, J.G., Gadow, K.v. 2006b. Site quality curves for birch stands in north-western Spain. *Silva Fennica* 40(4), 631-644.
- Echeverría, I. 1942. Ensayo de tablas de producción del "Pinus insignis" en el norte de España. *Boletín IFIE* nº 22.

- Echeverría, I., De Pedro, S. 1948. El *Pinus pinaster* en Pontevedra: su productividad normal y aplicación a la celulosa industrial. Boletín IFIE nº 38.
- Erviti, J.J. 1991. Desarrollo de modelos de crecimiento y producción de las masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Fernández López, A. 1982. Evolución del crecimiento y productividad del monte bajo de *Eucalyptus globulus* en rotaciones sucesivas. INIA, Departamento Forestal de Lourizán, Pontevedra (inédito).
- Fernández López, A. 1985. Efecto del espaciamiento inicial en la producción de *Eucalyptus globulus*. INIA, Departamento Forestal de Lourizán, Pontevedra (inédito).
- Fernández-Parajes, J. 2006. Autoecología, calidad de estación y xilología de *Quercus pyrenaica* Willd. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Gadow, K.v. 2001. Orientation and control in CCF systems. En: Gadow, K.v., Nagel, J., Saborowski, J. (Eds.). Continuous Cover Forestry: Assesment, Analysis, Scenarios. International IUFRO Conference, 19-21 September 2001, Göttingen. Kluwer, Dordrecht, pp. 211-217.
- Gadow, K.v., Rojo, A., Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R. 1999. Ensayos de crecimiento. Parcelas permanentes, temporales y de intervalo. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Fuera de Serie nº 1, 299-310.
- Gadow, K.v., Real, P., Álvarez González, J.G. 2001. Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. IUFRO World Series vol. 12, Viena.
- Gadow, K.v., Nagel, J., Saborowski, J. (Eds.) 2002. Continuous Cover Forestry: Assesment, Analysis, Scenarios. International IUFRO Conference, 19-21 September 2001, Göttingen. Kluwer, Dordrecht.
- García, O. 1994. Minimum data for forest plantation management. En: García, O., Martínez Millán, F.J. 1998. Seminario sobre modelos de crecimiento. Universidad Politécnica de Madrid.
- García, O. 2003. Dimensionality reduction in growth models: an example. Forest biometry, Modelling and Information Sciences 1, 1–15.
- García, O., Ruiz, F. 2003. A growth model for eucalypt in Galicia, Spain. For. Ecol. Manage. 173, 49-62.
- García Sánchez, S., Rodríguez Soalleiro, R., Álvarez González, J.G., González Costas, R., Vega Alonso, G. 1996. Primeros resultados de crecimiento de plantaciones de 15 a 30 años de Abeto Douglas (*Pseudotsuga menziessi* Mirb. Franco) en el noroeste de España. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. 5 (2), 231–244.
- Gorgoso, J.J. 2003. Caracterización de las distribuciones diamétricas de *Betula alba* L. en Galicia. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Hasenauer, H. 2006. Concepts within tree growth modeling. En: Hasenauer, H. (Ed.) Sustainable forest management. Growth models for Europe. Springer-Verlag, Berlin, pp. 3–17.
- Hernández, J. 2005. Ensayo de claras en una masa natural de *Pinus pinaster* Ait. en el municipio de Punxín (Ourense). Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Hummel, F.C., Locke, G.M., Jeffers, J.N., Christie, J.M. 1959. Code of sample plot procedure. Forestry Commission Bulletin nº 31.
- López-Sánchez, C.A. 2009. Estado selvícola y modelos de crecimiento y gestión de plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en España. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

- Lorenzo, J.J., Álvarez González, J.G. 2000. Primeros resultados de crecimiento y producción de las masas de *Eucalyptus nitens* en la provincia de Lugo. Actas del Congreso de Ordenación y Gestión Sostenible de Montes. Tomo I, 605-611.
- Madrigal, A. 1994. Ordenación de montes arbolados. Colección Técnica, ICONA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- Madrigal, A., Martínez Millán, F.J. 1992. Alternativas selvícolas del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Premio ENCE de investigación Forestal 1992 (inédito).
- Madrigal, A., Puertas, F., Martínez Millán, F.J. 1992. Tablas de producción para *Fagus sylvatica* L. en Navarra. Serie Agraria nº 3. Departamento de Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra, Pamplona.
- Madrigal, A., Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R., Rojo, A. 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.
- Martínez-Chamorro, E. 2004. Estudio del crecimiento, producción y gestión de las masas de *Pinus sylvestris* L. en Galicia. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Martínez, M.J. 2006. Primeros resultados de un ensayo de claras en una masa natural de *Pinus radiata* D. Don de procedencia gallega en el MVMC Serra Gorda, situada en el municipio de Begonte (Lugo). Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Mason, W.L., Kerr, G. 2004. Transforming even-aged conifer stands to continuous cover management. Forestry Commission Information Note 40. Edinburgh.
- Ministerio de Agricultura. 1970. Orden de 29 de diciembre de 1970 por la que se aprueban las Instrucciones Generales para la Ordenación de Montes Arbolados. BOE nº 36 de 11/02/1971, pp. 2238-2249.
- Molina, F., Ruiz Zorrilla, P. 1976. Tablas de producción de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. INIA, CRIDA 01, Departamento Forestal de Lourizán, Pontevedra (inédito).
- Nicolás, A., Gandullo, J.M. 1967. Ecología de los pinares españoles I. *Pinus pinaster* Ait. Instituto Forestal de investigaciones y Experiencias (IFIE), Ministerio de Agricultura, Madrid.
- Nutto, L., Touza, M.C. 2004. Producción de madera de sierra de alta calidad con *Eucalyptus globulus*. Revista CIS-Madera 12, 6-18.
- Nutto, L., Touza, M.C. 2006. Modelos de producción de madera sólida en plantaciones de *Eucalyptus globulus* de Galicia. Boletín del CIDEU nº 2, 37-50.
- Pereira, S.M. 2006. Primeiros resultados dun ensaio de claras nunha masa de *Pinus radiata* D. Don de procedencia Nova Zelandia no MVMC Serra Gorda, situado no municipal de Begonte (Lugo). Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Persson, O.A. 1992. A growth simulator for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Dpto. of Forest Yield Research, Report nº 31.
- Pita, P.A. 1966. La Producción de las masas de *Eucalyptus globulus* en el Norte de España. Anales del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE), Madrid, 45-60.
- Pommerening, A., Murphy, S.T. 2004. A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. Forestry 77(1), 27-44.
- Preciado, R. 2008. Ensayo de claras en una plantación de *Pseudotsuga menziesii* en el monte del Pazo Arrieta, parroquia de Bacurín, Lugo. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.

- Rodríguez Soalleiro, R. 1995. Crecimiento y producción de masas forestales regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Alternativas selvícolas posibles. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez Soalleiro, R., Álvarez González, J.G., Vega Alonso, G. 1994. Piñeiro do país. Modelos dinámico de crecemento de masas regulares de *Pinus pinaster* Aiton en Galicia. Capacitación e extensión, Manuais técnicos nº 8, Xunta de Galicia.
- Rojo, A., Rodríguez Soalleiro, R., Sánchez, F., Castedo-Dorado, F., Grandas-Arias, J.A. 2004. Dispositivos experimentales permanentes de la Unidad de Gestión Forestal Sostenible para el estudio de modelos de crecimiento forestal en Galicia. Cuadernos de la SECF 18, 255–260.
- Rojo, A., Álvarez González, J.G., Grandas-Arias, J.A., Diéguez-Aranda, U. 2005a. Tablas de producción de selvicultura media para el abedul (*Betula alba* L.) en Galicia. IV Congreso Forestal Nacional. Zaragoza, 26-30 septiembre 2005.
- Rojo, A., Crecente-Campo, F., Barrio-Anta, M., Balboa-Murias, M.A., Ferreiro-Abelairas, H. 2005b. Instalación de un ensayo de claras para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. IV Congreso Forestal Español. Zaragoza, 26-30 septiembre 2005.
- Ron, F. 2005. Caracterización dasométrica de las parcelas de un ensayo de clara para *Pinus radiata* D. Don en el MVMC Serra Gorda (Begonte, Lugo). Primeros resultados. Trabajo de investigación tutelado (Tercer Ciclo). Universidad de Santiago de Compostela.
- Sánchez, F. 2001. Estudio de la calidad de estación, crecimiento, producción y selvicultura de *Pinus radiata* en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Sánchez, F., Rodríguez Soalleiro, R., Rojo, A., Álvarez González, J.G., López-Sánchez, C.A., Gorgoso, J.J., Castedo-Dorado, F. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. 12(2), 65–83.
- Serrada, R., Montero, G., Reque, J.A. (Eds.) 2008. Compendio de selvicultura aplicada en España. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid.
- Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2005. Diccionario Forestal. Mundi-Prensa, Madrid.
- Stage, A.R. 1973. Prognosis model for stand development. USDA For. Serv., Res. Pap. INT-137.
- Toval, G., Vega Alonso, G. 1982. Metodología para la cuantificación del clima, primera aproximación de su aplicación en Galicia (España). Actas de la Reunión Técnica de Principios de Introducción de Especies, Lourizán.
- Valsta, L.T. 1993. Stand management optimization based on growth simulators. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 453.51.
- Vanclay, J. 1994. Modelling forest growth and yield. CAB International.
- Vega Alonso, P., Vega Alonso, G., González Rosales, M., Rodríguez San José, A. 1993a. Mejora del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. I Congreso Forestal Español, 14–18 de junio de 1993, Lourizán, Pontevedra. pp. 129–134. Tomo II.
- Vega Alonso, G., Puerto Arribas, G., Rodríguez Soalleiro, R., Vega Alonso, P., González Rosales, M. 1993b. La introducción de *Pseudotsuga menziesii* en el norte de España. I Congreso Forestal Español, 14–18 de junio de 1993, Lourizán, Pontevedra. pp. 65–70. Tomo II.
- Vila, P. 2003. Estudio epidémico y xilológico de las masas de *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. en el noroeste de la Península Ibérica. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela.
- Villarino, J.J. 1983. El abedul en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

- Villarino, J.J. 1993. Algunos resultados sobre crecimiento del abedul en parcelas situadas en la Terra Cha de Lugo. I Congreso Forestal Español, 14–18 de junio de 1993, Lourizán, Pontevedra. pp. 649–653. Tomo II.
- Villarino, J.J., Riesco, G. 1997. La relación diámetro de copa-diámetro normal en *Betula celtiberica* Rothm. et Vas. I Congreso Forestal Hispano-Luso IRATI 97, Pamplona. pp. 565-570. Tomo 4.
- Xunta de Galicia. 2001. O monte Galego en cifras. Dirección Xeral de Montes e Medio Ambiente Natural. Santiago de Compostela.

2. Calidad de estación

2.1. Introducción

Desde el inicio de la ciencia forestal a finales del siglo XVIII, uno de los principales deseos de los gestores e investigadores forestales ha sido poder estimar la producción de los montes y, lo que es más complejo, predecirla con suficiente antelación.

El crecimiento y la producción de los rodales forestales de una determinada especie o mezcla de especies están en gran parte determinados por cuatro factores (Clutter et al., 1983):

- ✓ La edad del rodal o, en el caso de rodales irregulares, la distribución de edades.
- ✓ La capacidad de producción innata del área que soporta la masa.
- ✓ El grado de utilización de esa capacidad productiva en el pasado y en el momento actual.
- ✓ Los tratamientos culturales aplicados (clareos, claras, fertilización, control de la vegetación competidora, etc.).

El segundo factor mencionado, la capacidad de producción innata de un área determinada, se denomina generalmente calidad de estación. El tercer factor, la ocupación de la estación, es en gran medida sinónimo del concepto de densidad de la masa.

2.1.1. Concepto de estación forestal

La estación forestal es una unidad geográfica más o menos uniforme en lo que respecta a los factores del medio (clima, suelo y topografía, fundamentalmente) y, por tanto, con una respuesta uniforme por parte de la biocenosis¹ (Bengoa, 1999a). Cuanto más restrictiva sea la interpretación de la uniformidad interna de la estación menor será, por lo general, su superficie. Por tanto, la estación engloba multitud de factores ambientales interactuando y que afectan al desarrollo de la vegetación.

2.1.2. Concepto de calidad de estación

La calidad de estación se puede definir como la capacidad productiva de un lugar concreto para el crecimiento de los árboles de una determinada especie como respuesta a la totalidad de

¹ Conjunto de organismos de especies diversas, vegetales o animales, que viven y se reproducen en un determinado biotopo (territorio o espacio vital cuyas condiciones ambientales son las adecuadas para que en él se desarrolle una determinada comunidad de seres vivos).

las condiciones ambientales existentes. Es decir, la calidad de una estación forestal es su “poder productivo” (Olazábal, 1883), o su “virtualidad productiva” (Mackay, 1944), por lo que se puede considerar, entonces, como una propiedad inherente del terreno, haya o no árboles creciendo en un momento determinado (Davis et al., 2001). Sin embargo, determinadas intervenciones humanas pueden modificar esa capacidad productiva inherente de un terreno, como por ejemplo fertilizaciones, laboreos, drenajes, etc.

Las siguientes razones justifican la importancia que tiene en la gestión forestal estimar correctamente la calidad de estación:

- ✓ Las estimaciones de la calidad de estación se pueden utilizar para identificar terrenos que sean más (o menos) apropiados para el crecimiento de diferentes especies arbóreas (por ejemplo, a la hora de implantar una especie mediante repoblación).
- ✓ El tamaño de los productos maderables y sus valores a diferentes edades están, en gran parte, controlados por la calidad de estación (y por la densidad de la masa).
- ✓ La respuesta a determinados tratamientos culturales a menudo difiere drásticamente entre áreas de distinta calidad de estación (Clutter et al., 1983). Por ello, ciertas inversiones que para una determinada especie están plenamente justificadas en estaciones de buena calidad constituyen desastres económicos en las estaciones menos productivas.

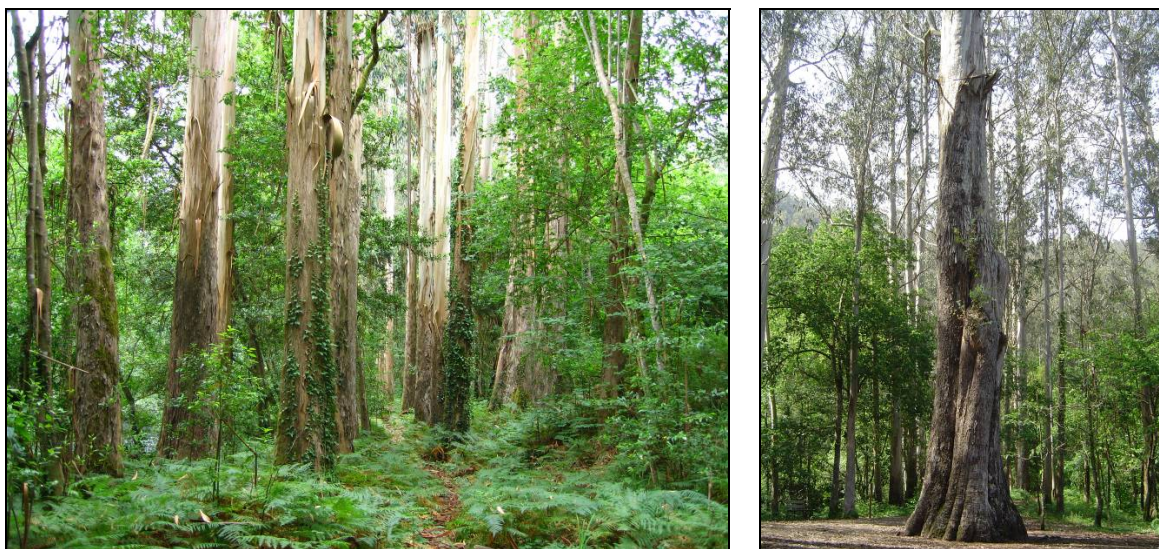


Figura 2.1. Los eucaliptos (*Eucalyptus globulus*) del “Souto da Retorta” de Chavín (Viveiro, Lugo), declarado “Monumento natural” en 2000 por la Xunta de Galicia, son un claro exponente de la elevada productividad forestal de gran parte del territorio gallego. Las mediciones llevadas a cabo en 1998 por miembros de la actual *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS) indicaron que una gran proporción de los árboles superaban los 50 m de altura, alcanzando alguno de ellos más de 66 m, lo que seguramente los convierte en el grupo de árboles más altos de Europa. El “abuelo” (derecha) es uno de los ejemplares más espectaculares, por ser el de mayor diámetro normal, 236,8 cm, tener casi 62 m de altura y contar con un volumen de fuste de más de 76 m³ (estimado mediante mediciones del diámetro a distintas alturas del tronco, tomadas mediante escalada).

2.1.3. Cómo evaluar la calidad de estación

Aunque la estación forestal es, en sentido estricto, independiente de la especie, la calidad de estación tiene significado únicamente con respecto a la especie o especies que se pueden considerar en la gestión de una localización particular (Clutter et al., 1983). Teóricamente, todos los factores que influyen en el crecimiento deberían emplearse para cuantificar la productividad de una estación determinada: el clima, la topografía, las características estáticas y dinámicas del suelo incluyendo el régimen del agua, la calidad genética de la población, la estructura de la comunidad vegetal, los animales, las actividades humanas y el tiempo. Para ello, lo más lógico parecería evaluar directamente la calidad de estación como la producción total al final del ciclo productivo, como se hace en agricultura (cosechas anuales), pero esto no es posible en el medio forestal porque los ciclos productivos requieren turnos largos. Por este motivo, la calidad de estación debe evaluarse indirectamente a través de atributos estacionales intrínsecos o extrínsecos al rodal forestal. Estos atributos o factores pueden ser (Ortega y Montero, 1988):

- ✓ Factores intrínsecos:
 - Estimación basada en la historia de la producción.
 - Estimación basada en datos del crecimiento medio máximo del rodal.
 - Estimación basada en datos de la altura del rodal.
- ✓ Factores extrínsecos:
 - Estimación por factores de la biocenosis (especies o asociaciones indicadoras).
 - Estimación por factores del biotopo (climáticos, edáficos, topográficos).

La mayor dificultad para evaluar la calidad de la estación es encontrar factores que sean buenos indicadores de la productividad potencial. La estimación por factores intrínsecos del rodal (evolución con la edad de alguna variable dasométrica) requiere que hayan existido o existan en la actualidad la especie o las especies de interés en la localización concreta para la que se desea evaluar la calidad de estación (lógicamente, la existencia pasada es útil sólo si las mediciones se hicieron en su tiempo y se guardaron hasta el presente). Esta metodología permite expresar de forma global la incidencia de los factores ecológicos, pero no puede aplicarse si no existe la masa o ésta se presenta muy alterada. En tal caso debe recurrirse al empleo de factores extrínsecos (clima, suelo, vegetación, etc.), que generalmente proporcionan peores resultados que los intrínsecos.

De las características intrínsecas, el volumen por unidad de superficie es la variable dasométrica que refleja más directamente la capacidad productiva de la estación. Sin embargo, tiene como inconvenientes el estar influenciado por la densidad del rodal, la dificultad de su medición en pie con precisión y la necesidad de conocer el volumen extraído en claras y el perdido por causas naturales (mortalidad natural). Por tal motivo, la calidad de la estación forestal

se evalúa generalmente en función del ritmo de crecimiento en altura de los árboles que crecen en condiciones de poca competencia.

2.1.4. Estimación de la calidad de estación basada en datos de altura del rodal. El índice de sitio y las curvas de calidad de estación

La utilización del crecimiento en altura de los árboles que viven en condiciones de poca competencia como indicador de la calidad de estación de un rodal forestal se justifica debido a que, para muchas especies, áreas de buena calidad de estación son también áreas de buenos crecimientos en altura. En otras palabras, para la mayoría de las especies la producción potencial en volumen y el crecimiento en altura están positivamente correlacionados.

La utilidad práctica de dicha correlación proviene de la evidencia empírica que indica que el patrón de crecimiento en altura de los árboles de mayores dimensiones en masas regulares (correspondientes a las clases sociológicas dominante y codominante, y por tanto con poca competencia de los restantes árboles) está poco afectado por la densidad del rodal y por las cortas intermedias efectuadas (excepto cuando se trata de claras por lo alto, por otra parte poco frecuentes), dentro de unos límites moderadamente amplios de espaciamiento que dependen de la especie (Clutter et al., 1983). Por ello, las técnicas más habituales para estimar la calidad de estación de un rodal se basan en el análisis de la evolución con la edad de la altura media de los árboles dominantes, que se denomina altura dominante (figura 2.2).

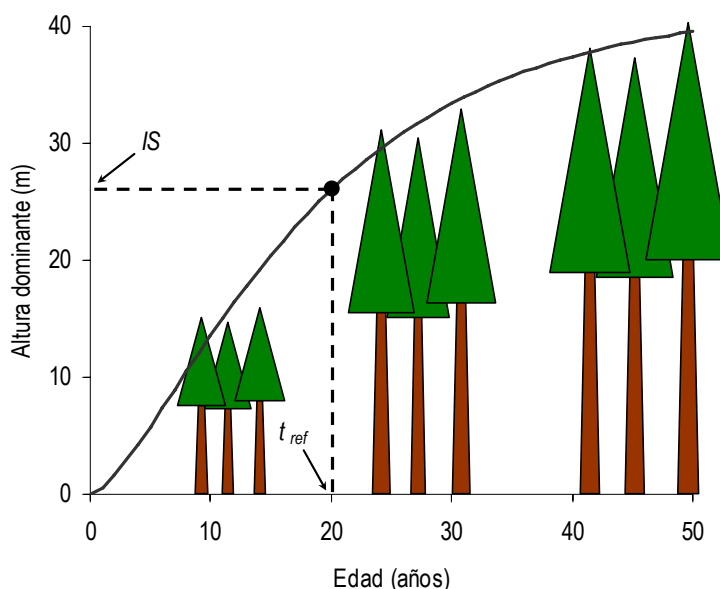


Figura 2.2. Representación esquemática de la evolución con la edad de la altura media de los árboles dominantes de un rodal regular y del índice de sitio IS a una determinada edad de referencia t_{ref} .

La forma más habitual de referenciar la calidad de estación utilizando la relación altura dominante-edad en rodales regulares es utilizar el denominado índice de sitio, que se define como el valor de su altura dominante a una determinada edad base o de referencia (figura 2.2). Aunque

la verdadera productividad de la estación no puede representarse completamente por el índice de sitio, este concepto es el más ampliamente aceptado, y quizás el más sencillo, para estimarla.

Una familia de curvas de índice de sitio (también denominadas “curvas de calidad de estación”) es un conjunto de curvas que muestran el patrón de crecimiento en altura dominante de los rodales de una determinada especie y zona geográfica, cada una de las cuales lleva asociado un número arábigo que las identifica (que es precisamente el valor del índice de sitio) o, como era habitual hasta hace poco tiempo, un número romano (que indica que la curva I es de mejor calidad que la II, y así sucesivamente). A su vez, las líneas intermedias entre cada dos curvas de calidad limitan unas franjas que se denominan clases de calidad, cada una de las cuales está precisamente representada por la curva de calidad media que le da nombre (figura 2.3).

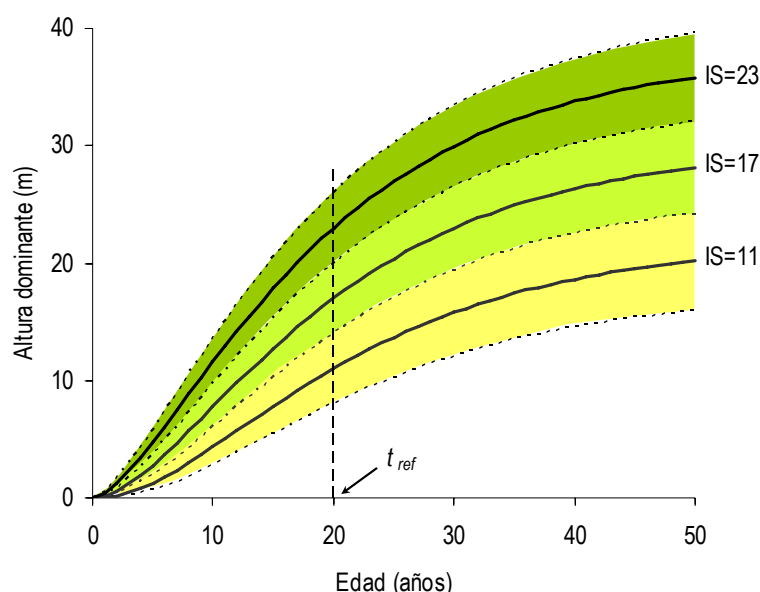


Figura 2.3. Ejemplo de unas curvas de calidad de estación para índices de sitio IS de 11, 17 y 23 m a la edad de referencia t_{ref} de 20 años. En diferentes colores se muestran las clases de calidad definidas por sus respectivas curvas medias (en línea continua) y delimitadas por las curvas intermedias (en línea discontinua).

Casi todas las curvas de índice de sitio publicadas recientemente se han desarrollado utilizando procedimientos de ajuste estadísticos, en especial la metodología de ecuaciones en diferencias algebraicas (Bailey y Clutter, 1974) o su generalización (Cieszewski y Bailey, 2000), que se comentan más adelante. En estos casos, la ecuación resultante define conjuntamente para una especie y zona geográfica los modelos de crecimiento en altura dominante y de índice de sitio. Es importante destacar que a partir de dicha ecuación se pueden generar infinitas curvas de calidad, aunque habitualmente sólo se representen gráficamente entre tres y cinco para una región y especie determinadas, en función del rango de variación de la altura dominante encontrado para la edad de referencia. La figura 2.4 muestra como ejemplo las curvas de calidad de estación elaboradas por Diéguez-Aranda et al. (2005a) para *Pinus radiata* en Galicia, para índices de sitio de 11, 16, 21 y 26 m a la edad de referencia de 20 años. Así, un rodal que en el momento de ser inventariado presente unos datos de edad y altura dominante coincidentes

exactamente con un punto de la curva etiquetada como 21, se espera, como media, que tenga un desarrollo de su altura dominante similar al de dicha curva.

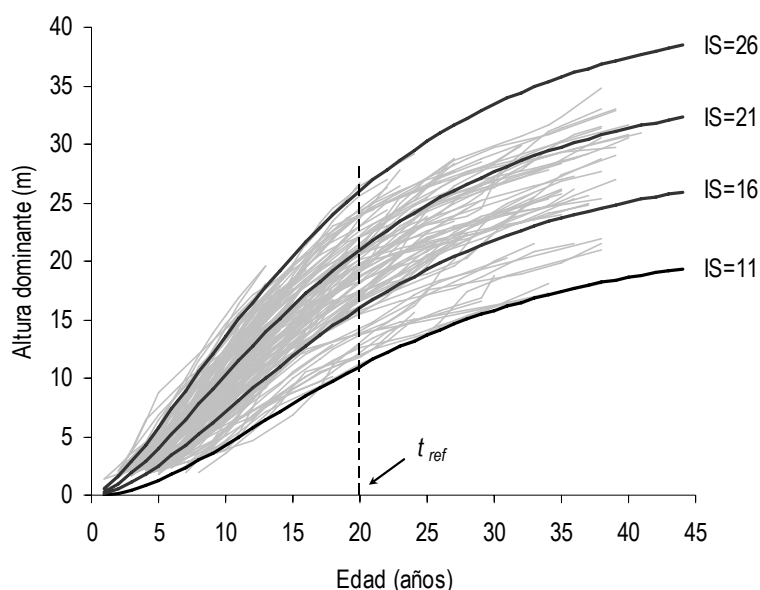


Figura 2.4. Curvas de calidad de estación (en negro) para *Pinus radiata* en Galicia para índices de sitio *IS* de 11, 16, 21 y 26 m a la edad de referencia t_{ref} de 20 años (en gris se muestran los datos obtenidos del análisis de tronco de los 161 árboles dominantes con los que se elaboraron).

Continuando con el ejemplo de *Pinus radiata* en Galicia, las curvas de la figura 2.4 se han generado a partir de la siguiente ecuación:

$$H_0 = IS \cdot \left(\frac{1 - \exp(-0,0674 \cdot t)}{1 - \exp(-0,0674 \cdot t_{ref})} \right)^{(-1,76 + 12,4/X_0)} \quad [2.1]$$

donde *IS* es el índice de sitio (m) a la edad de referencia t_{ref} de 20 años, H_0 es la altura dominante (m) estimada a la edad t (años), $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left((\ln IS + 1,76 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln IS + 1,76 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 12,4 \cdot L_0} \right)$ y $L_0 = \ln(1 - \exp(-0,0674 \cdot t_{ref}))$. Para cada índice de sitio (11, 16, 21 y 26 m) y edad (desde 1 hasta 43 años, de año en año) se ha estimado un valor de la altura dominante mediante la ecuación [2.1]; posteriormente, los pares de datos edad-altura dominante estimados se han representado gráficamente.

2.1.5. Fuentes de datos para elaborar curvas de índice de sitio

La elaboración de curvas de índice de sitio se puede realizar a partir de datos procedentes de tres fuentes distintas:

- ✓ Mediciones de edad y altura dominante en parcelas temporales (figura 2.5.a).

- ✓ Mediciones de edad y altura dominante en diferentes inventarios en parcelas permanentes (figura 2.5.b).
- ✓ Reconstrucción de patrones de desarrollo en altura con la edad de árboles dominantes por medio de análisis de troncos (figura 2.5.c).

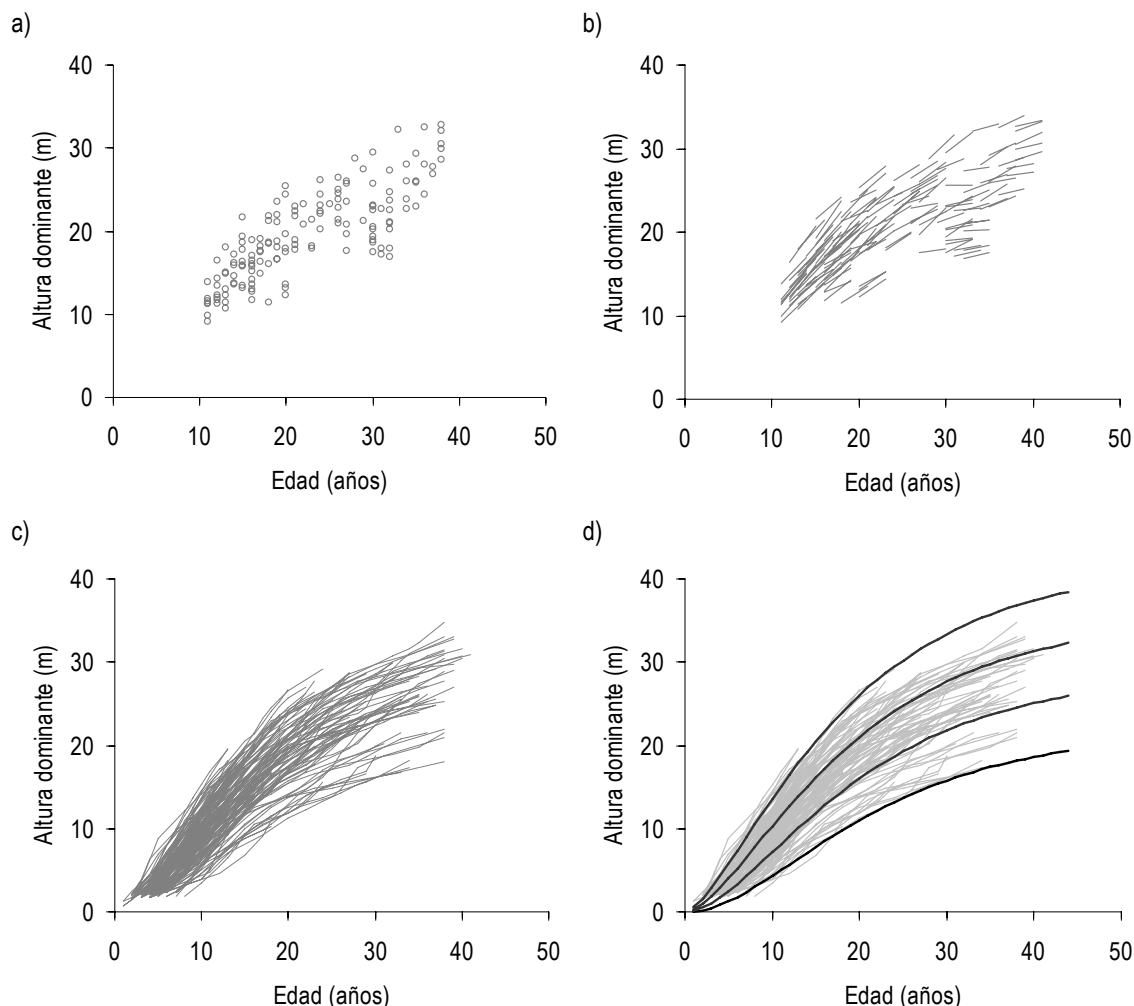


Figura 2.5. a) Datos de edad-altura dominante del primer inventario realizado en la red de parcelas de la UXFS para *Pinus radiata* en Galicia (ver capítulo 1), que corresponden a parcelas temporales al haberse considerado un único inventario. b) Datos de edad-altura dominante del primer y segundo inventarios realizados sobre las mismas parcelas. c) Datos obtenidos del análisis de tronco de 161 árboles dominantes seleccionados en las proximidades de la misma red de parcelas. d) Curvas de calidad de estación (en negro) para cuatro índices de sitio (ver figura 2.4) ajustadas a partir de la información obtenida del análisis de tronco de los 161 árboles dominantes (en gris).

Las parcelas temporales proporcionan los datos más sencillos y baratos de adquirir para desarrollar curvas de calidad de estación. Sin embargo, este tipo de datos no tienen en cuenta el crecimiento, por lo que únicamente se puede emplear el método de la curva guía (ver Clutter et al., 1983) para obtener una ecuación de evolución de la altura dominante con la edad. En este caso, a menos que la muestra cubra totalmente y con la misma intensidad las posibles combinaciones existentes de índice de sitio y clase de edad, las estimaciones que proporcionará la ecuación ajustada serán sesgadas.

El segundo y sucesivos inventarios de parcelas permanentes (según Gadown et al., 1999, si se inventarían dos veces se denominan parcelas de intervalo y si se hace más veces parcelas permanentes) proporcionan datos de crecimiento y permiten emplear técnicas de ajuste muy efectivas para desarrollar curvas de índice de sitio. Sin embargo, estos datos son los más costosos de adquirir y es necesario que pasen varios años desde la instalación y primera medición de las parcelas hasta que estén disponibles.

Los datos obtenidos del análisis de tronco de árboles dominantes seleccionados adecuadamente son prácticamente de la misma utilidad que los obtenidos de parcelas permanentes, siendo por tanto aplicables las mismas metodologías de ajuste. Aunque los costes de realizar dichos análisis son elevados, estos datos pueden obtenerse en un tiempo relativamente reducido.

2.1.6. Definición de altura dominante y edad

Existen numerosas definiciones del término “altura dominante” en la literatura forestal (ver, p. ej., Rennolls, 1978; Bengoa, 1999b). Las más habituales se basan en las alturas de un número fijo de árboles de grandes dimensiones por unidad de superficie. Un aspecto importante para no cometer errores al utilizar las curvas de calidad de estación es determinar correctamente cuántos árboles hay que medir y cómo deben seleccionarse para calcular la altura dominante.

En España generalmente se utiliza una definición de altura dominante derivada de la propuesta por Assmann¹ (1970), que consiste en calcular dicha variable como la media de las alturas de los cien árboles más gruesos (de mayor diámetro normal) por hectárea, sin hacer uso de la curva de alturas (ver capítulo 7) para su determinación. Cuando se estima la altura dominante a partir de datos de parcelas de muestreo, generalmente se selecciona en éstas un número proporcional de pies dominantes en función de la superficie de la parcela, por ejemplo la altura media de los diez árboles más gruesos en una parcela de 0,1 ha o los cuatro árboles más gruesos en una parcela de 0,04 ha. La altura dominante calculada de esta forma tiende a aumentar con el tamaño de parcela (ver explicación en García, 1998), por lo que se han propuesto algunos métodos para reducir parcialmente este efecto (García, 1998; García y Batho, 2004). No obstante, desde un punto de vista práctico los errores que se comenten con el procedimiento utilizado habitualmente no son demasiado importantes, por lo que ha sido el adoptado en este libro.

Por otra parte, resulta fundamental seleccionar, dentro de los árboles de mayor diámetro normal, aquellos que realmente pertenezcan a la clase sociológica de los dominantes y que presenten la copa entera, evitando elegir, por ejemplo, pies de borde o aislados que tengan una altura no dominante pero un diámetro elevado por haberse desarrollado sin competencia por algún lado o en condiciones de baja densidad.

¹ Assmann (1970) define la altura dominante de un rodal como la altura correspondiente al árbol que presenta la sección normal media de los cien árboles más gruesos por hectárea, obtenida a partir de la curva altura-diámetro.

Otra cuestión importante para utilizar correctamente las curvas de calidad de estación es calcular de manera adecuada la edad del rodal. Para ello, hay que tener presente que existen varias formas de definir esta variable:

- ✓ La llamada edad total del rodal.
- ✓ La edad de plantación o del rebrote.
- ✓ La edad a la altura normal (1,3 m).

La edad total del rodal se refiere a la edad que tienen los árboles desde el comienzo del crecimiento de su parte aérea (que diferirá de la edad de plantación en los años que la planta haya crecido en el vivero). Utilizar la edad de plantación o del rebrote tiene como ventaja que no es necesario realizar ninguna medición cuando se dispone de las fechas de plantación o de corta, respectivamente. Por último, para determinar la edad a la altura normal es necesario utilizar muestras extraídas con la barrena de Pressler y contar en ellas el número de anillos. El uso de esta edad tiene la ventaja de ser menos sensible al efecto que sobre la altura de los árboles puede tener la vegetación competidora durante los primeros años posteriores al establecimiento del arbolado. Lógicamente, la elección de uno u otro tipo de edad debe realizarse como paso previo al desarrollo de las curvas de calidad de estación, debiendo quedar perfectamente documentada la decisión adoptada para que la medición de la edad en los árboles dominantes no ofrezca dudas y permita utilizar las curvas sin error.

Por último, conviene indicar que también es de suma importancia utilizar un criterio adecuado para seleccionar la muestra de árboles dominantes a partir de los que calcular la edad del rodal. Idealmente debería determinarse esta variable en los mismos árboles que se utilizan para calcular la altura dominante, pero debido a que esto supondría un gran esfuerzo de muestreo, el procedimiento más habitual es seleccionar aleatoriamente dos o tres árboles dominantes y realizar en ellos las mediciones oportunas.

2.2. Material y métodos

Hasta el momento se han publicado curvas de calidad de estación aplicables a rodales regulares monoespecíficos de las siguientes especies en Galicia: *Betula alba* (Rojo et al., 2005; Diéguez-Aranda et al., 2006a), *Eucalyptus globulus* (Fernández López, 1982, 1985, disponibles en Madrigal et al., 1999; García y Ruiz, 2003), *Pinus pinaster* (Echeverría y De Pedro, 1948; Molina y Ruiz Zorrilla, 1976; Bará y Toval, 1983; Álvarez González et al., 2005; García, 2005), *Pinus radiata* (Sánchez et al., 2003; Diéguez-Aranda et al., 2005a), *Pinus sylvestris* (Diéguez-Aranda et al., 2005b), *Pseudotsuga menziesii*¹ (López-Sánchez, 2009) y *Quercus robur* (Barrio-Anta y

¹ Los datos de *Pseudotsuga menziesii* fueron recogidos en árboles dominantes apeados en Asturias y Guipúzcoa, pero los modelos estáticos que se presentan en el capítulo 3 fueron elaborados también con datos de Galicia.

Diéguez-Aranda, 2005). La mayor parte de los modelos más recientes se han desarrollado en el seno del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela.

2.2.1. Datos

Las curvas de calidad de estación que se presentan en el apartado de resultados de este capítulo para las especies *Betula alba*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur* fueron desarrolladas a partir de datos obtenidos del análisis de tronco de 1.057 árboles dominantes (ver distribución por especies en la tabla 2.1), que se seleccionaron en las proximidades de las parcelas pertenecientes a la red de la UXFS descrita en el capítulo 1.

Tabla 2.1. Número de árboles dominantes sometidos a análisis de tronco que se utilizaron para desarrollar las curvas de calidad de estación de las diferentes especies.

Especie	Nº de árboles
<i>Betula alba</i>	214
<i>Pinus pinaster</i> (costa)	104
<i>Pinus pinaster</i> (interior)	99
<i>Pinus radiata</i>	161
<i>Pinus sylvestris</i> ¹	228 (+ 79 parcelas)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	117
<i>Quercus robur</i>	133

En los casos en que fue posible se seleccionaron dos árboles dominantes en las inmediaciones de cada parcela (aunque dentro del mismo rodal) siguiendo las recomendaciones de Madrigal et al. (1992), que se sometieron a análisis de tronco. Antes de cortar cada árbol se realizaron dos mediciones perpendiculares de su diámetro normal (diámetro a 1,3 m sobre el terreno medidos desde la parte ladera arriba del árbol, apreciando al milímetro). Una vez apeado se midió con cinta métrica, aproximando al centímetro, la longitud total del tronco, que posteriormente se dividió en trozas de longitud comprendida entre 1 y 2,5 m, anotándose dicha longitud también con aproximación al centímetro. En la base de cada troza se contabilizó el número de anillos, que se utilizó para calcular la edad que tenía el árbol cuando alcanzó la altura de dicha sección, restando para ello el número de anillos en cada sección al número de anillos contados en el tocón (figura 2.6). La edad utilizada se puede considerar, dentro de las definidas con anterioridad, como edad de plantación (si bien sólo en el caso de *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris* la totalidad de los rodales en los que recogieron los datos correspondieron a plantaciones), asumiendo que habitualmente la altura del tocón (20-30 cm) corresponde, aproximadamente, a la de las plantas procedentes de vivero que se usan al realizar la plantación.

¹ Los datos empleados para desarrollar la ecuación de calidad de estación de *Pinus sylvestris* incluyen también la altura dominante obtenida de la primera y segunda mediciones de 79 parcelas de investigación. Dicha altura se calculó para cada parcela e inventario como la altura media de la proporción, en función de la superficie de la parcela, de los cien árboles con mayor diámetro normal por hectárea.

Debido a que las secciones de corte no coincidieron exactamente con la finalización del crecimiento periódico en altura, los pares de datos edad-altura de cada sección se corrigieron utilizando el método de Carmean (1972) y la modificación propuesta por Newberry (1991) para la sección superior del árbol.

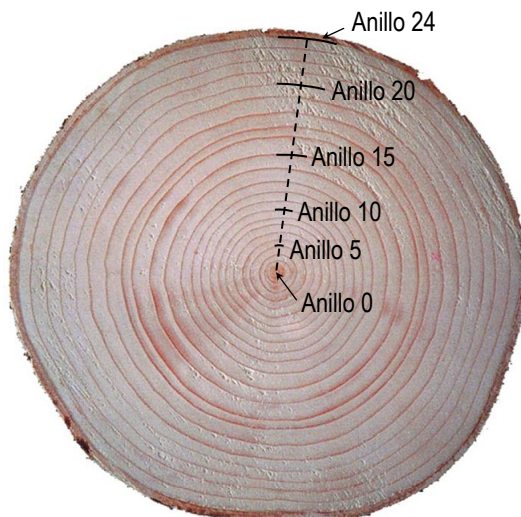


Figura 2.6. Rodaja extraída de la base de un árbol de la especie *Pinus sylvestris* para contabilizar el número de anillos y, por tanto, su edad.

Para construir las curvas de calidad de estación para *Pinus pinaster* se utilizaron los datos procedentes del análisis de tronco de árboles dominantes empleados por Álvarez González et al. (2005), que fueron recogidos de forma similar a lo indicado para las anteriores especies en las proximidades de la red de parcelas del Centro de Investigaciones Forestales (CIF) de Lourizán. Las ecuaciones que se presentan han sido ajustadas específicamente para este libro con el fin de utilizarlas como parte de un nuevo modelo dinámico de crecimiento para la especie (ver capítulo 4). En este caso, se ha considerado la diferente pauta de crecimiento de las dos zonas que fueron definidas para *Pinus pinaster* en Galicia por Vega Alonso et al. (1993): costa e interior (ver apartado 1.3 y figura 1.13).

Las curvas de calidad de estación que se presentan para *Eucalyptus globulus* fueron desarrolladas por García y Ruiz (2003) a partir de los datos recogidos en 113 parcelas de 200 m² del inventario forestal continuo de la empresa ENCE, correspondientes a rodales de segundo turno (masas de chirpiales de primera brotación). En este caso, la altura dominante de cada parcela se calculó como la altura media de los dos árboles de mayor diámetro normal.

En la figura 2.7 se muestran para cada especie las trayectorias observadas de evolución de la altura con la edad de los árboles dominantes sometidos a análisis de tronco que se utilizaron para desarrollar las ecuaciones de calidad de estación, en las que se pueden apreciar los rangos de datos y su distribución por clases de edad. No se incluye el gráfico correspondiente a *Eucalyptus globulus* por no disponer de los datos originales, aunque una figura similar se puede consultar en la publicación de García y Ruiz (2003).

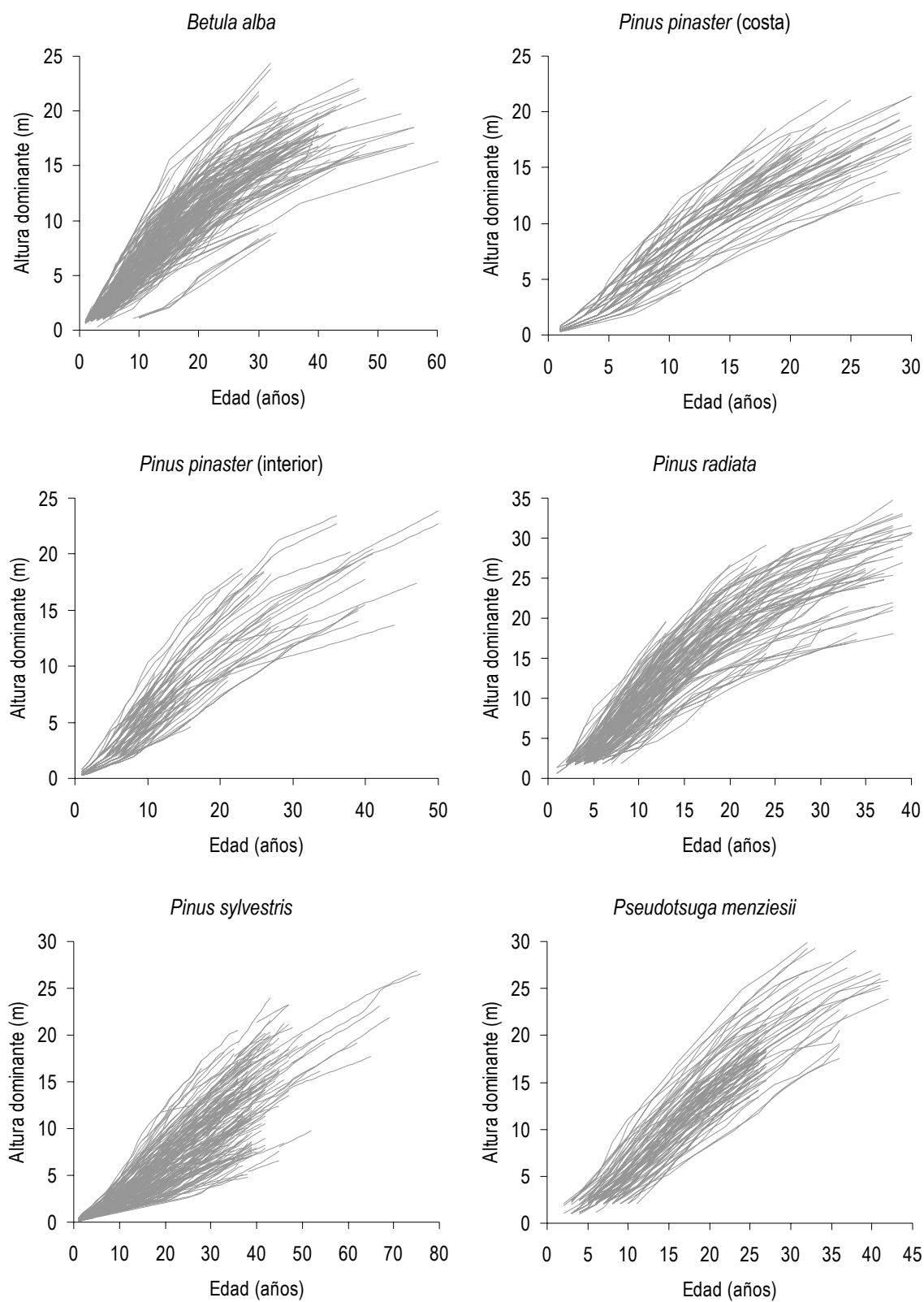


Figura 2.7. Trayectorias observadas de evolución de la altura con la edad de los árboles dominantes sometidos a análisis de tronco que se utilizaron para desarrollar las curvas de calidad de estación de las diferentes especies.

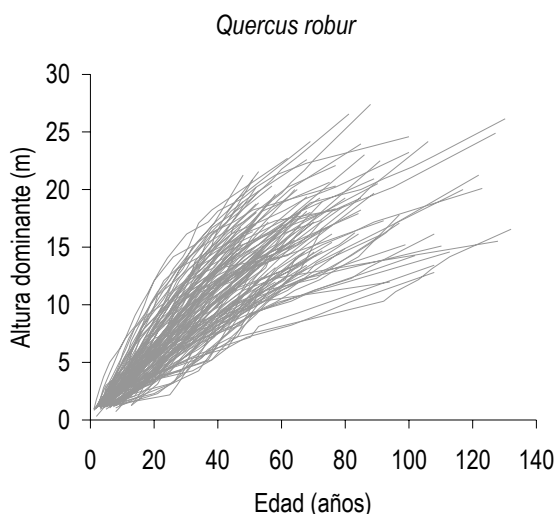


Figura 2.7 (continuación). Trayectorias observadas de evolución de la altura con la edad de los árboles dominantes sometidos a análisis de tronco que se utilizaron para desarrollar las curvas de calidad de estación de las diferentes especies.

2.2.2. Modelos y metodologías de ajuste

La alternativa más empleada para desarrollar curvas de calidad de estación es utilizar ecuaciones dinámicas de la forma $H_{02} = f(t_2, t_1, H_{01})$, donde H_{02} es el valor de la función (en este caso altura dominante) a la edad t_2 y H_{01} es el valor de la misma función a la edad t_1 . Estas ecuaciones dinámicas cumplen dos propiedades esenciales:

- ✓ Son invariantes con respecto a la edad de referencia, es decir, cualquier par de puntos (t_1, H_{01}) de una curva concreta puede emplearse para hacer predicciones a la edad t_2 y las estimaciones obtenidas serán siempre las mismas.
- ✓ Son invariantes con respecto al intervalo de proyección, de modo que el resultado de proyectar primero de t_1 a t_2 y luego de t_2 a t_3 es el mismo que el obtenido en un solo paso de t_1 a t_3 . Además, para el caso concreto de modelización de la altura dominante de un rodal, una única ecuación dinámica define conjuntamente la curva de evolución con la edad de esta variable y el modelo de índice de sitio.

Bailey y Clutter (1974) fueron los primeros en formalizar la propiedad de invarianza con respecto a la edad de referencia, aunque en un sentido más amplio, ya que además implica que la estimación de los parámetros de la ecuación dinámica debe realizarse empleando una metodología de ajuste que sea también invariante con respecto a dicha edad (*Base Age Invariant*, BAI), es decir, que las estimaciones de los parámetros no dependan de un punto arbitrariamente seleccionado como referencia y que permita el empleo de todos los datos disponibles. Estos autores propusieron una metodología para obtener ecuaciones dinámicas con estas características que se conoce en la literatura forestal como *Algebraic Difference Approach* (ADA,

metodología de ecuaciones en diferencias algebraicas), y que esencialmente se basa en la premisa de que es posible modelizar el crecimiento de una determinada variable con una familia de curvas originadas por un modelo de crecimiento base con todos los parámetros comunes excepto uno, que es un parámetro específico de la estación forestal. Por tanto, se podrían obtener para cada modelo de crecimiento base tantas ecuaciones dinámicas en diferencias como parámetros tenga dicho modelo.

Cieszewski y Bailey (2000) propusieron una generalización de ADA, denominada *Generalized Algebraic Difference Approach* (GADA), cuya principal ventaja radica en que se pueden obtener ecuaciones dinámicas a partir de un modelo de crecimiento base permitiendo que más de un parámetro dependa de las condiciones específicas de la estación forestal, lo que posibilita obtener familias de curvas más flexibles. Además, para muchos modelos base, el uso de GADA es la única forma de generar familias de curvas polimórficas¹ con múltiples asíntotas, una propiedad importante que deberían cumplir las ecuaciones de calidad de estación. Esta metodología es también adecuada para desarrollar modelos válidos para la estimación de variables relacionadas con crecimiento, producción y supervivencia (p. ej., área basimétrica del rodal G , número de pies por hectárea N , volumen del rodal V).

Ejemplos de modelos de crecimiento base que han funcionado satisfactoriamente en muchos trabajos de investigación, y que permiten obtener ecuaciones dinámicas mediante ADA y GADA, son los de Bertalanffy-Richards (Bertalanffy, 1947, 1949; Richards, 1959; ecuación [2.2]), Hossfeld (1822; ecuación [2.3]) y Korf (citado en Lundqvist, 1957; ecuación [2.4]).

$$H_0 = a_1 \cdot (1 - \exp(-a_2 \cdot t))^{a_3} \quad [2.2]$$

$$H_0 = \frac{a_1}{1 + a_2 \cdot t^{-a_3}} \quad [2.3]$$

$$H_0 = a_1 \cdot \exp(-a_2 \cdot t^{-a_3}) \quad [2.4]$$

donde H_0 es la altura dominante (aunque podría ser cualquier otra variable de las indicadas anteriormente) a la edad t , y a_1 , a_2 y a_3 son los parámetros del modelo a estimar en el ajuste.

Un sistema efectivo de estimación de parámetros debe basarse en identificar las tendencias individuales representadas en los datos (Bailey y Clutter, 1974; García, 1983; Cieszewski et al., 2000; Cieszewski, 2003). Estas tendencias se pueden modelizar considerando que las respuestas de todos los individuos siguen una forma funcional similar, con parámetros que varían entre individuos (parámetros locales) y parámetros que son comunes a todos los individuos (parámetros

¹ Las ecuaciones de calidad de estación se suelen clasificar en dos tipos de acuerdo con la naturaleza de las familias de curvas que generan: anamórficas y polimórficas. En las primeras, el cociente entre dos curvas cualesquiera de una misma familia es constante para todas las edades, por lo que cada curva tiene una asíntota diferente. En las familias de curvas polimórficas esta relación de proporcionalidad no se cumple, pudiendo diferenciarse a su vez entre familias de curvas con una asíntota común o con asíntotas diferentes.

globales). Ejemplos de este tipo de métodos, que son además invariantes con respecto a la edad de referencia (BAI), son los utilizados por Bailey y Clutter (1974), García (1983), Gregoire et al. (1995) y Cieszewski et al. (2000).

Para el ajuste de las ecuaciones de calidad de estación de *Betula alba*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pseudotsuga menziesii* que se presentan en este libro se ha utilizado el método de variables *dummy* propuesto por Cieszewski et al. (2000). Los correspondientes a las especies *Pinus sylvestris* y *Quercus robur* se han ajustado mediante una metodología alternativa a los indicados métodos BAI propuesta por Goelz y Burk (1992). Por último, la ecuación de calidad de estación que se presenta para *Eucalyptus globulus* ha sido ajustada por García y Ruiz (2003) mediante la metodología desarrollada por García (1983).

2.3. Resultados

En la tabla 2.2 se muestran las ecuaciones de calidad de estación que se consideran más adecuadas para las principales especies con interés comercial en Galicia. Todas las estimaciones de los parámetros han resultado significativas al nivel del 5%. También se muestran los valores de los correspondientes estadísticos de bondad del ajuste, el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), cuyo significado y expresión pueden consultarse en el anexo II. En el caso de *Pinus pinaster* los estadísticos de bondad del ajuste son comunes para las dos zonas (costera e interior), ya que el ajuste se ha realizado de forma conjunta mediante el empleo de variables *dummy*.

Las ecuaciones que se presentan son las publicadas en los trabajos de Diéguez-Aranda et al. (2006a) para *Betula alba*, García y Ruiz (2003) para *Eucalyptus globulus*, Diéguez-Aranda et al. (2005a) para *Pinus radiata*, Diéguez-Aranda et al. (2005b) para *Pinus sylvestris*, López-Sánchez (2009) para *Pseudotsuga menziesii* y Barrio-Anta y Diéguez-Aranda (2005) para *Quercus robur*, por considerarse los que mejor describen las tendencias observadas de evolución de la altura dominante con la edad. Las ecuaciones para *Pinus pinaster* se han desarrollado específicamente para este libro a partir de los datos utilizados por Álvarez González et al. (2005).

Como ya se ha comentado, estas ecuaciones de calidad de estación definen conjuntamente para cada especie los modelos de crecimiento en altura dominante y de índice de sitio. Así, permiten obtener directamente la altura dominante H_{02} (m) a una edad t_2 (años) a partir de la altura dominante H_{01} (m) a cualquier otra edad t_1 (años). También permiten estimar la altura H_{02} a la edad t_2 a partir del índice de sitio IS (m) y su edad de referencia asociada t_{ref} (años), para lo que hay que sustituir IS por H_{01} y t_{ref} por t_1 en cada una de las ecuaciones que se exponen en la tabla 2.2. De forma similar, se puede estimar IS a la edad t_{ref} elegida a partir de la altura H_{01} a la edad t_1 , sustituyendo IS por H_{02} y t_{ref} por t_2 en cada una de las ecuaciones anteriores.

Tabla 2.2. Ecuaciones de calidad de estación para las principales especies con interés comercial en Galicia.

<i>Betula alba</i>	R^2	REMC
$H_{02} = \frac{19,80 + X_0}{1 + 758,0/X_0 \cdot t_2^{-1,398}},$ <p>donde $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(H_{01} - 19,80 + \sqrt{(19,80 - H_{01})^2 + 4 \cdot 758,0 \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,398}} \right)$</p>	0,989	0,505 m
<i>Eucalyptus globulus</i>	R^2	REMC
$H_{02} = 31,60 \cdot \left(1 - \left(1 - (H_{01}/31,60)^{0,6339} \right)^{t_2/t_1} \right)^{1/0,6339}$	--	--
<i>Pinus pinaster</i> (costa e interior)	R^2	REMC
$H_{02} = \frac{72,69 - 27,86 \cdot I + X_0}{1 - (2,993 + 5,084 \cdot I) \cdot X_0 \cdot t_2^{-1,486}},$ <p>donde $X_0 = \frac{H_{01} - 72,69 + 27,86 \cdot I}{1 + (2,993 + 5,084 \cdot I) \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,486}}$ e I es una variable <i>dummy</i> (ficticia) que toma el valor 1 para la zona costera y 0 para la zona interior</p>	0,993	0,469 m
<i>Pinus radiata</i>	R^2	REMC
$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{1 - \exp(-0,06738 \cdot t_2)}{1 - \exp(-0,06738 \cdot t_1)} \right)^{(-1,755 + 12,44/X_0)},$ <p>donde $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left((\ln H_{01} + 1,755 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln H_{01} + 1,755 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 12,44 \cdot L_0} \right)$ y $L_0 = \ln(1 - \exp(-0,06738 \cdot t_1))$</p>	0,995	0,552 m
<i>Pinus sylvestris</i>	R^2	REMC
$H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}} \right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{1,277}}$	0,990	0,527 m
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	R^2	REMC
$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{1 - \exp(-0,05221 \cdot t_2)}{1 - \exp(-0,05221 \cdot t_1)} \right)^{(-9,568 + 40,49/X_0)},$ <p>donde $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left((\ln H_{01} + 9,568 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln H_{01} + 9,568 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 40,49 \cdot L_0} \right)$ y $L_0 = \ln(1 - \exp(-0,05221 \cdot t_1))$</p>	0,996	0,417 m
<i>Quercus robur</i>	R^2	REMC
$H_{02} = 129,0 \cdot \left(\frac{H_{01}}{129,0} \right)^{(t_1/t_2)^{0,3019}}$	0,972	0,980 m

Nota: los estadísticos de bondad del ajuste correspondientes a la especie *Eucalyptus globulus* no están disponibles en la publicación original.

Aunque las ecuaciones se han ajustado con metodologías invariantes con respecto a la edad de referencia, su uso práctico para estimar la calidad de estación a partir de un par de datos edad-altura dominante requiere seleccionar una edad base a la que referenciar el índice de sitio. Inversamente, el índice de sitio y su correspondiente edad base pueden también utilizarse para estimar la altura dominante a otra edad. La edad de referencia debe seleccionarse de manera que permita predecir de forma fiable la altura dominante a otras edades, teniendo en cuenta que el crecimiento en altura dominante puede ser errático a edades jóvenes, pero considerando también que una edad base temprana ayudará a una pronta toma de decisiones acerca de los posibles tratamientos que se deberían aplicar a la masa (Diéguez-Aranda et al., 2006b). En la tabla 2.3 se muestran las edades de referencia seleccionadas para cada especie.

Tabla 2.3. Edades de referencia seleccionadas para cada especie.

Especie	Edad de referencia (t_{ref} , años)
<i>Betula alba</i>	20
<i>Eucalyptus globulus</i>	7
<i>Pinus pinaster</i> (costa e interior)	20
<i>Pinus radiata</i>	20
<i>Pinus sylvestris</i>	40
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	20
<i>Quercus robur</i>	60

En la figura 2.8 se representan las curvas de calidad de estación de cada especie para diferentes índices de sitio a sus correspondientes edades de referencia.

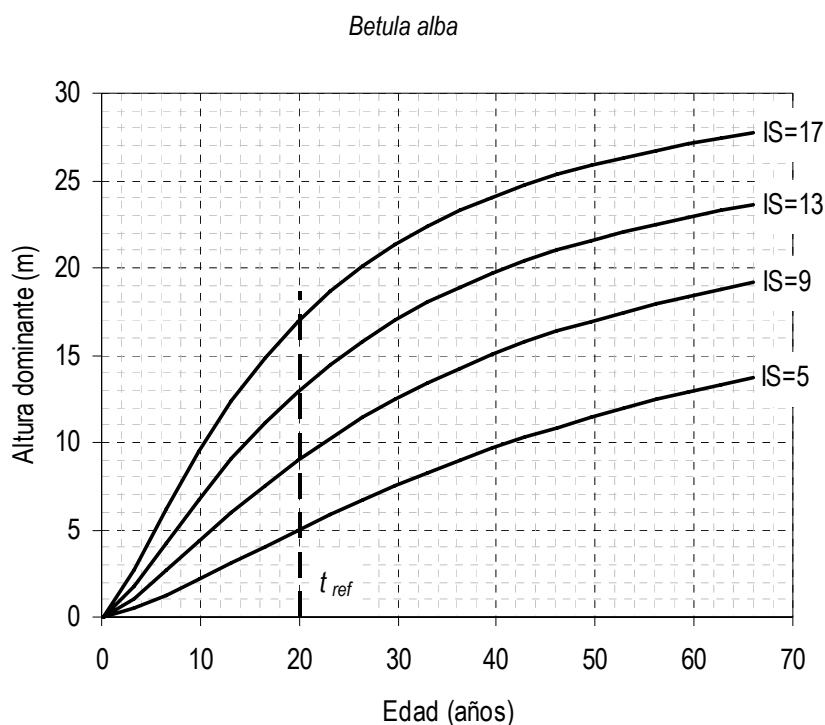


Figura 2.8. Curvas de calidad de estación para las principales especies con interés comercial en Galicia para diferentes índices de sitio IS a sus correspondientes edades de referencia t_{ref} .

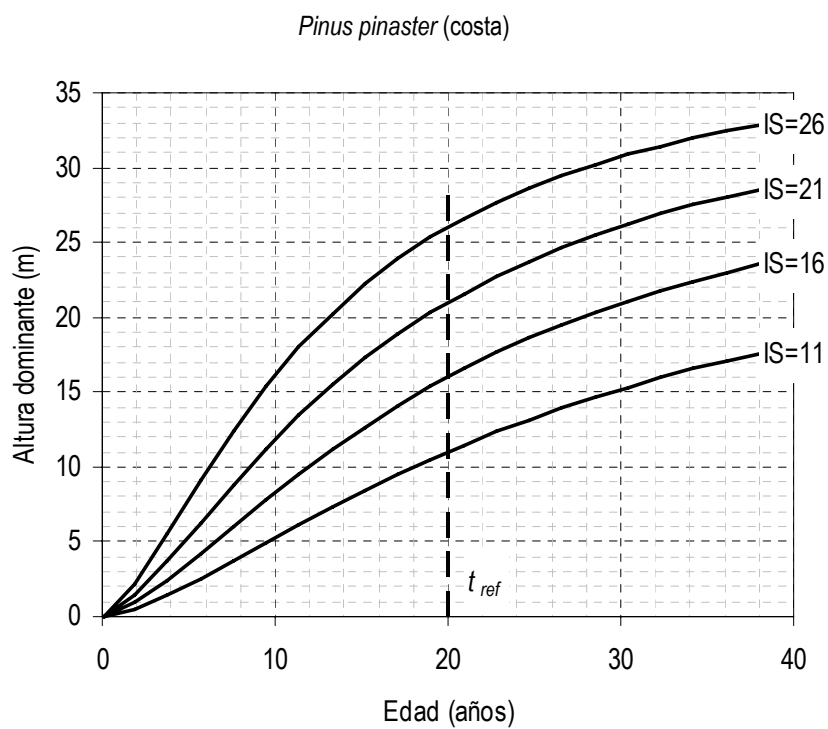
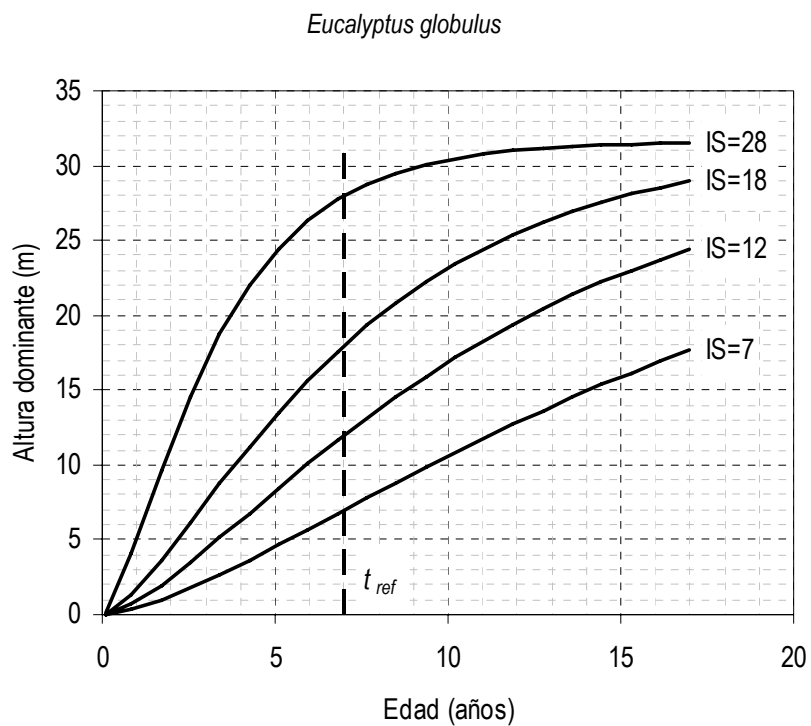


Figura 2.8 (continuación). Curvas de calidad de estación para las principales especies con interés comercial en Galicia para diferentes índices de sitio IS a sus correspondientes edades de referencia t_{ref} .

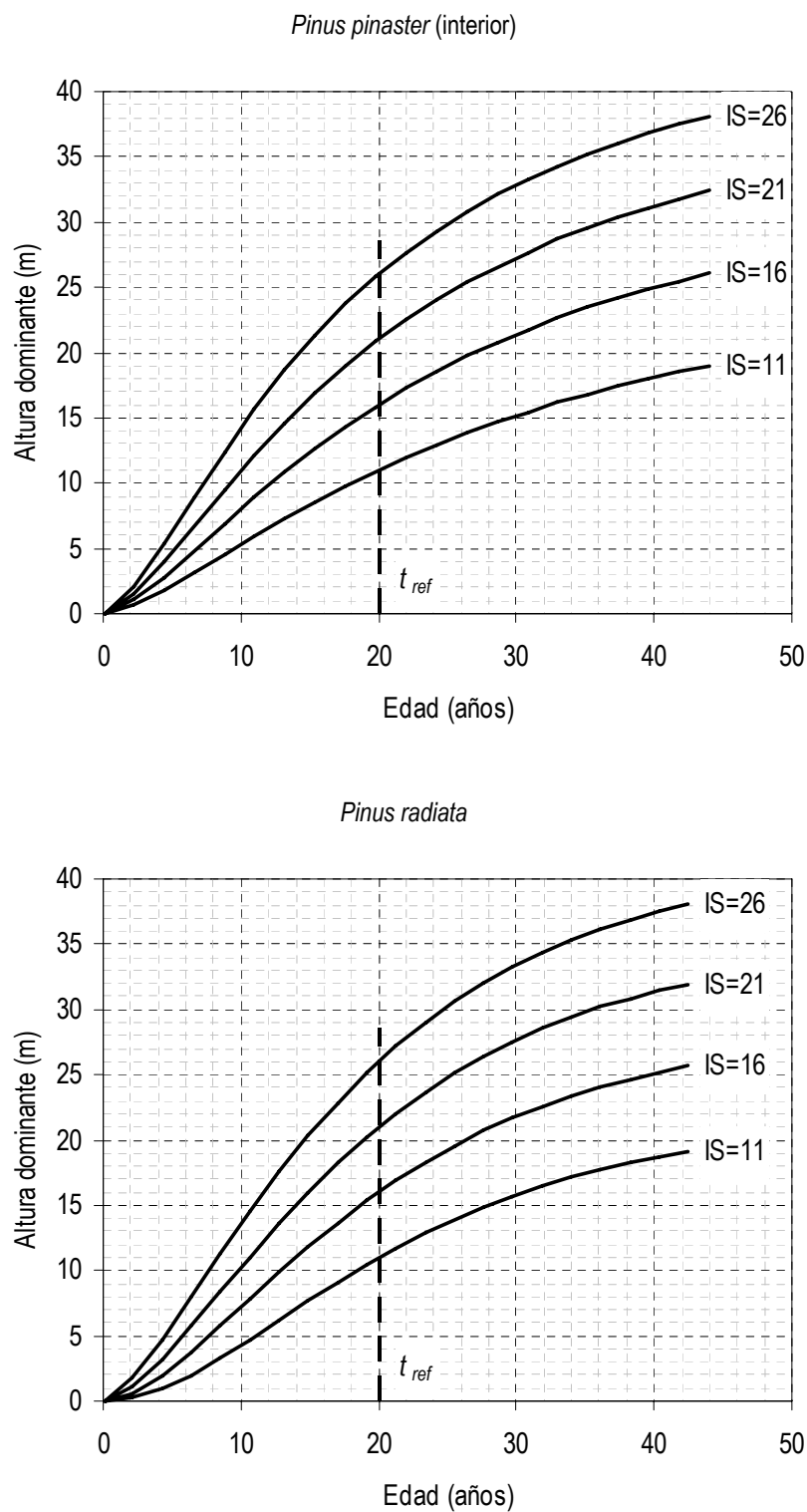


Figura 2.8 (continuación). Curvas de calidad de estación para las principales especies con interés comercial en Galicia para diferentes índices de sitio IS a sus correspondientes edades de referencia t_{ref} .

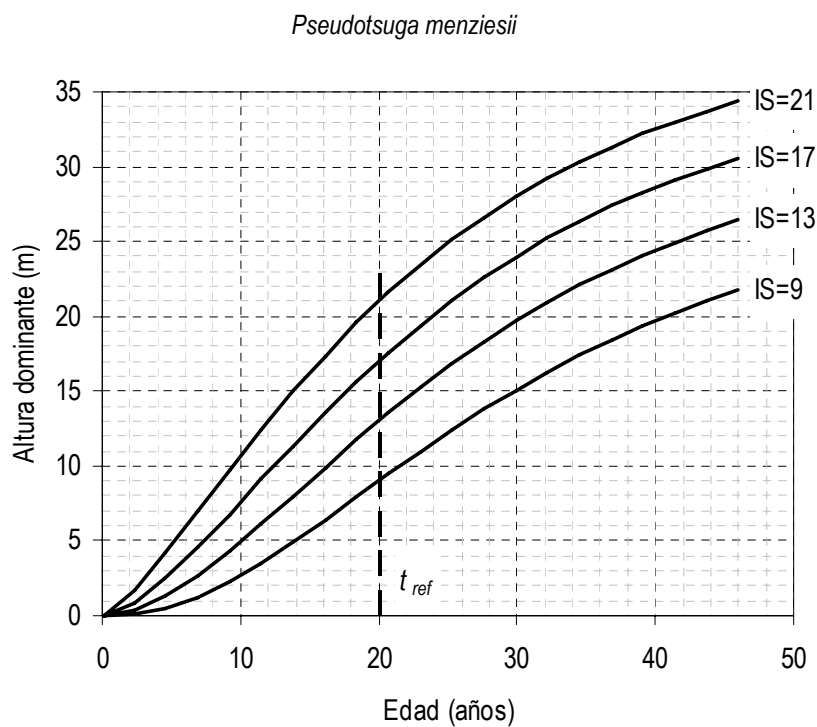
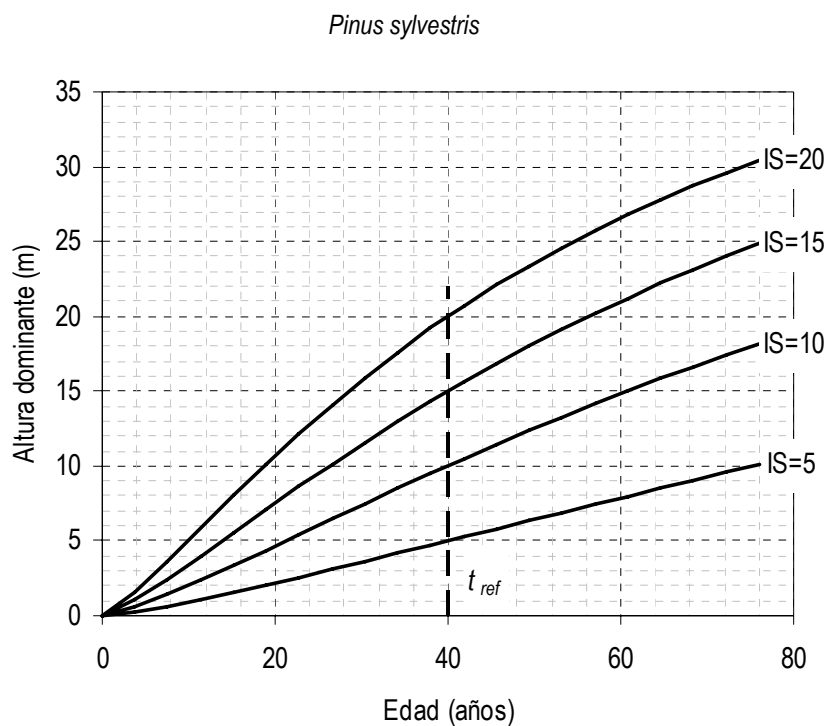


Figura 2.8 (continuación). Curvas de calidad de estación para las principales especies con interés comercial en Galicia para diferentes índices de sitio IS a sus correspondientes edades de referencia t_{ref} .

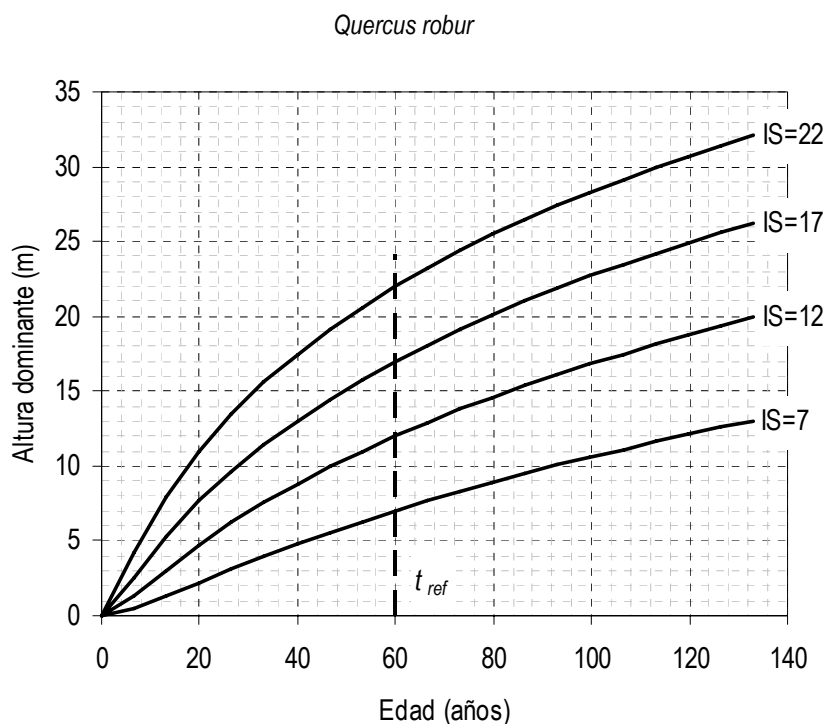


Figura 2.8 (continuación). Curvas de calidad de estación para las principales especies con interés comercial en Galicia para diferentes índices de sitio IS a sus correspondientes edades de referencia t_{ref} .

2.4. Conclusiones y recomendaciones

Las ecuaciones de calidad de estación que se presentan en este capítulo para diversas especies en Galicia permiten estimar conjuntamente la evolución de la altura dominante del rodal con la edad y el índice de sitio, variable fundamental para la caracterización del potencial de crecimiento asociado a una determinada área forestal. Asimismo, la calidad de estación (dada por el índice de sitio o la altura dominante a una determinada edad) es una parte esencial de los modelos de crecimiento y producción, tanto estáticos como dinámicos, tal y como se muestra en los capítulos 3 y 4 de este libro.

La mayoría de las ecuaciones de calidad de estación que se han incluido en este libro se han construido a partir de datos que cubren los turnos de corta habituales en Galicia para las especies estudiadas, por lo que pueden utilizarse sin restricciones en este sentido. La única excepción es la ecuación de calidad de estación desarrollada para *Pinus sylvestris*, ya que en este caso, como se ha comentado en el capítulo 1, todas las masas gallegas proceden de repoblación, habiéndose efectuado las primeras plantaciones de importancia en la década de los años 50 del siglo pasado. Por tal motivo, prácticamente ninguna de las parcelas y ninguno de los árboles dominantes muestreados superaron en el momento de su medición los 60 años de edad, valor que marca el

límite superior de validez del modelo. No obstante, teniendo en cuenta que la mayoría de las masas forestales de esta especie se cortarán a edades próximas a los 80-100 años, y que el modelo desarrollado ha mostrado buenas propiedades de extrapolación, el sistema de calidad de estación podría utilizarse con cautela para edades superiores a los 60 años.

Por otra parte, según García y Ruiz (2003), el modelo desarrollado para *Eucalyptus globulus* en Galicia tiene una asíntota horizontal (31,6 m) inferior a la altura observada en muchos eucaliptales en esta región, por lo que también debe utilizarse con cautela. Asimismo, es importante recordar que estas curvas de calidad se desarrollaron a partir de datos de rodales de chirpiales de primera brotación, por lo que no son aplicables a rodales procedentes de monte alto o a rodales de tercer y sucesivos turnos.

En todos los casos, conviene recordar que el comportamiento del crecimiento en altura dominante durante los primeros años de establecimiento de una masa forestal puede ser errático, por lo que la evaluación de la calidad de estación en rodales demasiado jóvenes a partir de datos de crecimiento en altura dominante puede no resultar el método más conveniente para estimar la capacidad productiva de la estación forestal.

Si se dispone de varias observaciones de edad y altura dominante de un rodal se pueden utilizar diferentes procedimientos para estimar el índice de sitio, pero en la mayoría de los casos resulta suficiente con utilizar la media de los valores de este índice estimados con las ecuaciones de calidad de estación para cada par de datos medido (García, 1996).

2.5. Ejemplo de uso de las ecuaciones de calidad de estación

En el CD-ROM adjunto a este libro se incluye el archivo de Microsoft® Office Excel 2003 denominado 02_CE.xls ("Calidad de Estación"), que permite hacer los siguientes cálculos para cualquier rodal regular de las especies para las que se presentan las ecuaciones de calidad de estación:

- ✓ Estimar el índice de sitio a partir de la altura dominante a una edad determinada y representar dicho par de datos sobre un gráfico que contiene las correspondientes curvas de calidad.
- ✓ Estimar la altura dominante a una edad determinada a partir de la altura dominante a otra edad.
- ✓ Estimar la altura dominante a una edad determinada a partir del índice de sitio.

Para ilustrar los cálculos que se realizan en dicho archivo, a continuación se exponen varios supuestos prácticos del empleo de una ecuación de calidad de estación, tomando como ejemplo la ecuación desarrollada por Diéguez-Aranda et al. (2005b) para plantaciones de *Pinus sylvestris* en Galicia:

$$H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,277}} \quad [2.5]$$

donde H_{02} y H_{01} son las alturas dominantes (m) a las edades t_1 y t_2 (años), respectivamente.

En la figura 2.9 se muestran las curvas de calidad generadas con esa ecuación [2.5], para unos índices de sitio IS de 5, 10, 15 y 20 m a la edad de referencia t_{ref} de 40 años elegida para la especie en Galicia.

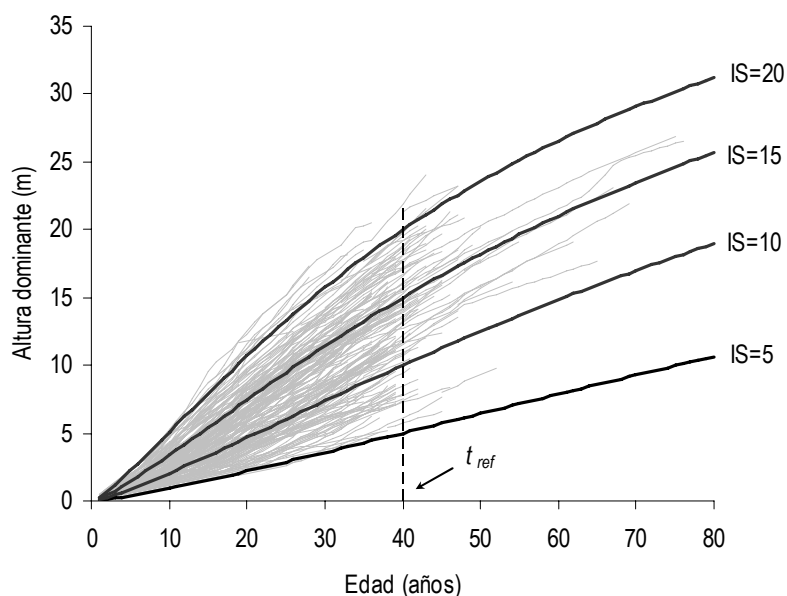


Figura 2.9. Curvas de calidad de estación (en negro) para *Pinus sylvestris* en Galicia para índices de sitio IS de 5, 10, 15 y 20 m a la edad de referencia t_{ref} de 40 años (en gris se muestran los datos utilizados para su construcción).

Cálculo del índice de sitio a partir de la altura dominante a una edad determinada

Para calcular el índice de sitio IS a la edad de referencia seleccionada para *Pinus sylvestris* en Galicia ($t_{ref} = 40$ años) de un rodal de 25 años de edad que tiene una altura dominante de 13 m, deben sustituirse en la ecuación [2.5] t_1 y H_{01} por 25 y 13 respectivamente, y t_2 por la edad de referencia seleccionada:

$$IS = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_{ref}}\right)^{1,277}} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{13}\right) \cdot \left(\frac{25}{40}\right)^{1,277}} = 19,6 \text{ m} \quad [2.6]$$

En la figura 2.10 se muestra la representación gráfica de dicho cálculo.

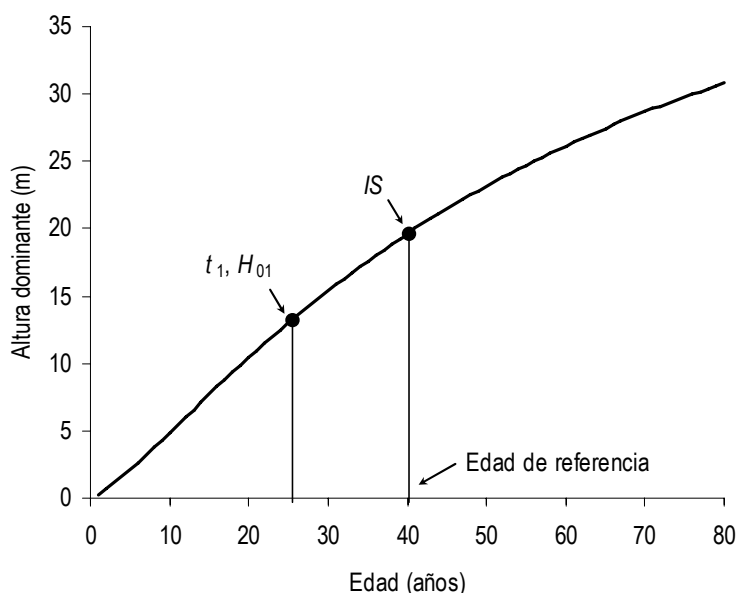


Figura 2.10. Representación gráfica de la estimación del índice de sitio de un rodal de *Pinus sylvestris* a la edad de referencia de 40 años a partir de la altura dominante (13 m) a los 25 años.

Cálculo de la altura dominante a una edad determinada a partir de la altura dominante a otra edad

Si se conoce la altura dominante de un rodal ($H_{01} = 15$ m) a una determinada edad ($t_1 = 32$ años), la altura dominante (H_{02}) que se espera que tenga ese mismo rodal a otra edad ($t_2 = 50$ años) se calculará como:

$$H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,277}} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{15}\right) \cdot \left(\frac{32}{50}\right)^{1,277}} = 21,7 \text{ m} \quad [2.7]$$

En la figura 2.11 se muestra la representación gráfica de dicho cálculo.

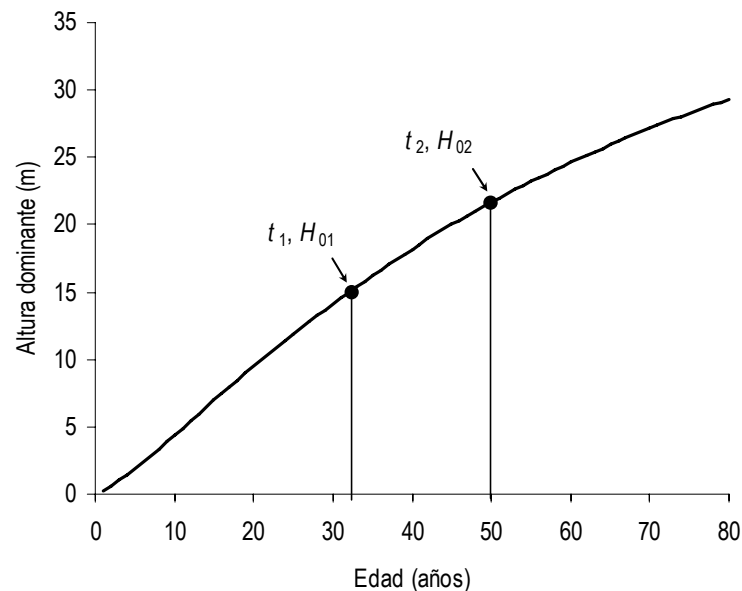


Figura 2.11. Representación gráfica de la estimación de la altura dominante de un rodal de *Pinus sylvestris* a los 50 años a partir de la altura dominante (15 m) a los 32 años.

Cálculo de la altura dominante a una edad determinada a partir del índice de sitio

Para calcular la altura dominante H_{02} de un rodal a una edad t_2 de 18 años sabiendo que el índice de sitio es 15 m (es decir, la altura dominante de la masa a la edad de referencia de 40 años es 15 m), deben sustituirse en la ecuación [2.5] t_1 y H_{01} por 40 y 15 respectivamente, y t_2 por la edad de proyección, es decir 18 años:

$$H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{IS}\right) \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t_2}\right)^{1,277}} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{15}\right) \cdot \left(\frac{40}{18}\right)^{1,277}} = 6,7 \text{ m} \quad [2.8]$$

En la figura 2.12 se muestra la representación gráfica de dicho cálculo.

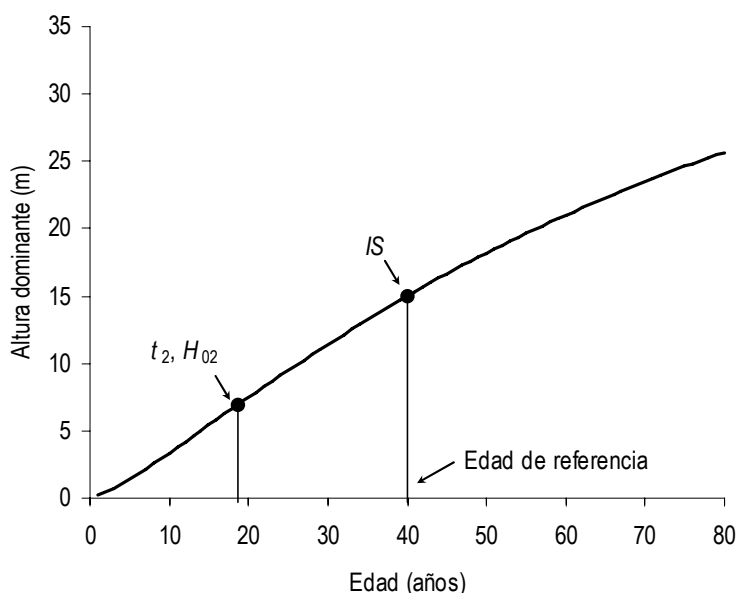


Figura 2.12. Representación gráfica de la estimación de la altura dominante de un rodal de *Pinus sylvestris* a los 18 años a partir de su índice de sitio (15, es decir, la altura dominante de la masa a la edad de referencia de 40 años es 15 m).

2.6. Bibliografía

- Álvarez González, J.G., Ruiz González, A.D., Rodríguez Soalleiro, R., Barrio-Anta, M. 2005. Ecoregional site index models for *Pinus pinaster* in Galicia (northwestern Spain). *Ann. For. Sci.* 62, 115-127.
- Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study. Ed. Pergamon Press. Oxford.
- Bailey, R.L., Clutter, J.L. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *For. Sci.* 20, 155-159.
- Bará, S., Toval, G. 1983. Calidad de estación de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales nº 24, Madrid.
- Barrio-Anta, M., Diéguez-Aranda, U. 2005. Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain). *Eur. J. For. Res.* 124, 19-28.
- Bengoa, J.L. 1999a. Análisis de un modelo de crecimiento en altura de masas forestales. Aplicación a las masas de *Quercus pyrenaica* de La Rioja. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Bengoa, J.L. 1999b. Estimación de la altura dominante de la masa a partir de la "altura dominante de parcela". Ventajas frente a la altura dominante de Assman. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Fuera de Serie* nº 1, 311-321.
- Bertalanffy, L.v. 1949. Problems of organic growth. *Nature* 163, 156-158.
- Bertalanffy, L.v. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *Quarterly Review of Biology* 32, 217-231.
- Carmean, W.H. 1972. Site index curves for upland oaks in the Central States. *For. Sci.* 18, 109-120.
- Cieszewski, C.J. 2003. Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV function $Y^3 = (ax^m)/(c + x^{m-1})$, a simplified mixed-model and scant subalpine fir data. *For. Sci.* 49, 539-554.
- Cieszewski, C.J., Bailey, R.L. 2000. Generalized Algebraic Difference Approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.* 46, 116-126.
- Cieszewski, C.J., Harrison, M., Martin, S.W. 2000. Practical methods for estimating non-biased parameters in self-referencing growth and yield models. University of Georgia PMRC-TR 2000-7.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H., Bailey, R.L. 1983. Timber management: a quantitative approach. Krieger Publishing Company, New York.
- Davis, L.S., Johnson, K.N., Bettinger, P.S., Howard, T.E. 2001. Forest management: to sustain ecological, economic and social values. McGraw-Hill Series in Forest Resources, New York.
- Diéguez-Aranda, U., Burkhardt, H.E., Rodríguez Soalleiro, R. 2005a. Modelling dominant height of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in north-western Spain. *For. Ecol. Manage.* 215, 271-284.
- Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G., Barrio-Anta, M., Rojo, A. 2005b. Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (north-western Spain). *Ann. For. Sci.* 62, 143-152.
- Diéguez-Aranda, U., Grandas-Arias, J.A., Álvarez González, J.G., Gadow, K.v. 2006a. Site quality curves for birch stands in north-western Spain. *Silva Fennica* 40(4), 631-644.
- Diéguez-Aranda, U., Burkhardt, H.E., Amateis, R.L. 2006b. Dynamic site model for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations in the United States. *For. Sci.* 52(3), 262-272.
- Echeverría, I., De Pedro, S. 1948. El *Pinus pinaster* en Pontevedra: su productividad normal y aplicación a la celulosa industrial. *Boletín IFIE* nº 38.

- Fernández López, A. 1982. Evolución del crecimiento y productividad del monte bajo de *Eucalyptus globulus* en rotaciones sucesivas. INIA, Departamento Forestal de Lourizán, Pontevedra (inédito).
- Fernández López, A. 1985. Efecto del espaciamiento inicial en la producción de *Eucalyptus globulus*. INIA, Departamento Forestal de Lourizán, Pontevedra (inédito).
- Gadow, K.v., Rojo, A., Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R. 1999. Ensayos de crecimiento. Parcelas permanentes, temporales y de intervalo. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Fuera de Serie nº 1, 299-310.
- García, O. 1983. A stochastic differential equation model for the height growth of forest stands. Biometrics 39, 1059-1072.
- García, O. 1996. Toward new site index curves for Douglas-fir in the Netherlands. Working paper. Royal Veterinary and Agricultural University, Department of Economics and Natural Resources, Unit of Forestry.
- García, O. 1998. Estimating top height with variable plot sizes. Can. J. For. Res. 28, 1509-1517.
- García, O. 2005. Comparing and combining stem analysis and permanent sample plot data in site index models. For. Sci. 51(4), 277-283.
- García, O., Batho, A. 2005. Top height estimation in lodgepole pine sample plots. West. J. Appl. For. 20(1), 64-68.
- García, O., Ruiz, F. 2003. A growth model for eucalypt in Galicia, Spain. For. Ecol. Manage. 173, 49-62.
- Goelz, J.C.G., Burk, T.E. 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. Can. J. For. Res. 22, 776-784.
- Gregoire, T.G., Schabenberger, O., Barrett, J.P. 1995. Linear modelling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent-plot measurements. Can. J. For. Res. 25, 137-156.
- Hossfeld, J.W. 1822. Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten (Gotha, 4. Bd., S. 310).
- López-Sánchez, C.A. 2009. Estado selvícola y modelos de crecimiento y gestión de plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en España. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Lundqvist, B. 1957. On the height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden, Medd. Fran Statens Skogforsk. Band 47, 1-64.
- Mackay, E. 1944. Fundamentos y métodos de la ordenación de montes (1ª parte). Escuela Especial de Ingenieros de Montes. Madrid.
- Madrigal, A., Puertas, F., Martínez Millán, F.J. 1992. Tablas de producción para *Fagus sylvatica* L. en Navarra. Serie Agraria nº 3. Departamento de Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra, Pamplona.
- Madrigal, A., Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R., Rojo, A. 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.
- Molina, F., Ruiz Zorrilla, P. 1976. Tablas de producción de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. INIA, CRIDA 01, Departamento Forestal de Lourizán (inédito).
- Newberry, J.D. 1991. A note on Carmean's estimate of height from stem analysis data. For. Sci. 37, 368-369.
- Olazábal, L. de. 1883. Ordenación y valoración de montes. Madrid.
- Ortega, A., Montero, G. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. Ecología 2, 155-184.

- Rennolls, K. 1978. "Top height": Its definition and estimation. *Commonwealth Forestry Review* 57, 215-219.
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10, 290-300.
- Rojo, A., Álvarez González, J.G., Grandas-Arias, J.A., Diéguez-Aranda, U. 2005. Tablas de producción de selvicultura media para el abedul (*Betula alba* L.) en Galicia. IV Congreso Forestal Nacional. Zaragoza, 26-30 septiembre 2005.
- Sánchez, F., Rodríguez Soalleiro, R., Rojo, A., Álvarez González, J.G., López-Sánchez, C.A., Gorgoso, J.J., Castedo-Dorado, F. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* 12(2), 65–83.
- Vega Alonso, P., Vega Alonso, G., González Rosales, M., Rodríguez San José, A. 1993. Mejora del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. I Congreso Forestal Español, 14–18 de junio de 1993, Lourizán, Pontevedra. pp. 129–134. Tomo II.

3. Modelos estáticos de crecimiento y producción

3.1. Introducción

Como se ha explicado en el capítulo 1, existen diferentes clasificaciones de los modelos de crecimiento y producción en el campo forestal, y una de las más difundidas es la que distingue entre modelos estáticos y dinámicos. Ya se ha comentado que los modelos estáticos son sistemas estructurados de relaciones matemáticas, estadísticas y/o lógicas que no consideran ni dependen de la tasa de crecimiento de los árboles y/o los rodales forestales (lo que constituye su principal diferencia con los modelos dinámicos), pero que, a pesar de ello, pueden dar lugar a buenos resultados en el caso de rodales no aclarados o en aquellos en los que se haya aplicado un tratamiento similar, siempre que se cuente con un elevado número de datos experimentales.

De esta manera, un modelo de crecimiento es estático si se ha construido a partir de los datos de un único inventario de una red de parcelas, pero también si se han utilizado datos de parcelas inventariadas en más de una ocasión y no se han tenido en cuenta los crecimientos observados en cada parcela en las metodologías de ajuste empleadas (al contrario de lo que ocurre en los modelos dinámicos).

Cuando se dispone de datos de rodales regulares con un solo inventario y que cubren un amplio rango de edades, densidades y calidades, como es el caso de las especies *Betula alba* y *Quercus robur* en Galicia, y de *Pseudotsuga menziesii* en España, la única opción es, entonces, desarrollar modelos de crecimiento y producción de rodal y estáticos. Este tipo de modelos, a pesar de su menor precisión en relación con los modelos dinámicos, representan el paso inicial a llevar a cabo cuando se pretende estudiar el desarrollo o crecimiento de una especie y no se dispone de otra herramienta.

Los modelos estáticos de rodal más conocidos son las tablas de producción, que deben su nombre a que tradicionalmente se han presentado en forma de tablas o cuadros numéricos. Actualmente también se elaboran herramientas selvícolas similares pero con formato gráfico, denominadas diagramas de manejo de la densidad (DMD), que permiten hacer estimaciones rápidas de la producción. Este tipo de herramientas, a diferencia de las tablas de producción, no presupone ninguna evolución de la densidad, sino que es el propio usuario quien fija su esquema de claras y lo dibuja sobre el gráfico, leyendo directamente en él los valores de las variables que le puedan interesar. Además, los DMD son independientes de la edad del rodal, lo que es una ventaja importante en el caso de rodales no regulares. Adicionalmente, a partir de los DMD también se pueden obtener los resultados de las producciones y crecimientos con un formato similar al de las tablas de producción, siempre y cuando se conozca el índice de sitio del rodal. Ambas herramientas, tablas de producción y DMD, proporcionan resultados prácticamente

idénticos si se construyen utilizando las mismas ecuaciones para predecir el diámetro medio cuadrático del rodal y su volumen.

En este capítulo se presentan unas tablas de producción y unos DMD para los rodales regulares de *Betula alba* y *Quercus robur* en Galicia, así como para los de *Pseudotsuga menziesii* en España. Estas herramientas son los modelos de crecimiento y producción más avanzados que se pueden construir actualmente para las tres especies, pues de momento únicamente se cuenta con un inventario de las redes de parcelas de crecimiento instaladas en sus masas.



Figura 3.1. Plantación adulta de *Betula alba* en San Breixo (Lugo).

Como se ha comentado en el capítulo introductorio, también existen tablas de producción y/o DMD para otras especies en Galicia. Así, para las plantaciones de *Pinus radiata* se han elaborado unas tablas de producción (Sánchez, 2001; Sánchez et al., 2003) y un DMD (Castedo-Dorado et al., 2007; 2009); para las de *Pinus sylvestris* se han construido tablas de producción (Martínez-Chamorro, 2004; 2007); y para los rodales regulares de *Pinus pinaster* se ha elaborado un DMD (Barrio-Anta et al., 2006). Ninguna de estas herramientas se ha incluido en este libro, debido a que actualmente están disponibles modelos dinámicos para esas tres especies de pino (elaborados a partir de, al menos, dos inventarios de cada parcela), que son más flexibles y fiables. Dichos modelos dinámicos se presentan en el capítulo 4.

3.2. Tablas de producción

3.2.1. Definición, concepto y utilidades

Las tablas de producción son modelos estáticos de crecimiento y producción de rodales forestales regulares, que han sido y son utilizadas frecuentemente en casi todo el mundo, aunque a medida que se van desarrollando modelos dinámicos para la misma especie y ámbito geográfico su uso se descarta frente a estas últimas herramientas, más fiables y flexibles. Una de las definiciones más conocidas de las tablas de producción es la de Madrigal (1991), que las describe como cuadros numéricos que muestran la evolución en el tiempo de las variables de un rodal forestal coetáneo o regular, de una especie dada, dentro de un ámbito geográfico determinado, para distintas clases de calidad de estación y para uno o diferentes tratamientos selvícolas.

En este libro se ha considerado, y se pretende enfatizar, que las tablas de producción son siempre modelos estáticos, es decir, que se construyen a partir de un único inventario de una red de parcelas o, menos frecuentemente, utilizando datos de parcelas inventariadas en más de una ocasión pero sin tener en cuenta sus crecimientos a la hora de aplicar las metodologías de ajuste de las ecuaciones con que se elaboran (al contrario de lo que ocurre en los modelos dinámicos), como ya se ha comentado. De esta forma, se quiere distinguir conceptualmente entre las tablas de producción desarrolladas de alguna de las maneras que se acaban de describir y las tablas o cuadros numéricos generados a partir de modelos dinámicos de crecimiento, que describen la evolución con la edad de las variables de un rodal regular con un formato similar al de las tablas de producción. Este último es el caso, por ejemplo, de las tablas obtenidas a partir del modelo dinámico desarrollado por Rodríguez Soalleiro (1995) para los rodales gallegos de *Pinus pinaster* y que describen los cuatro regímenes selvícolas propuestos por el autor: selvicultura de máxima renta en especie, producción preferente de madera de desintegración, selvicultura multiproducto y selvicultura de plantación a espaciamiento semidefinitivo (disponibles también en Madrigal et al., 1999).

Para entender el verdadero significado de las tablas de producción y poder aplicarlas correctamente, resulta imprescindible tener en cuenta que representan rodales con pies que cubren completamente toda la superficie, es decir, sin grandes huecos, situación que no siempre se cumple. Esta circunstancia obliga a que los valores de producción y crecimiento de las tablas deban ser adaptados para cada rodal, empleando para ello un factor de corrección que tenga en cuenta sus características diferenciales con respecto a la situación media mostrada en las tablas. A tal respecto, Vannière (1984) indica que las tablas de producción son “un modelo idealizado, válido como promedio para una región dada, y que es preciso emplear con precaución. Se trata de un cierto número de puntos de referencia, de identificaciones cifradas, pero en ningún caso de tablas que conduzcan a valores seguros y ciertos”. Este hecho, sin embargo, no disminuye en absoluto su utilidad como instrumento de gestión y planificación, como ha demostrado la larga tradición en su uso por gran parte de los forestales europeos (Madrigal, 1991).

Cuando se habla de tablas de producción de una especie en una zona geográfica determinada generalmente se hace referencia a un conjunto o familia de tablas y no a una única. En cada caso, el número de tablas viene determinado, por un lado, por el número de clases de calidad que habitualmente se establecen para el área de estudio (se construye una tabla para cada clase de calidad), y por otro, por el número de regímenes selvícolas que se hayan considerado en las parcelas de muestreo utilizadas (se construye una tabla para cada tratamiento selvícola considerado, dentro de cada calidad de estación). Así, la calidad de estación (ver capítulo 2) es una variable fundamental que se debe conocer para usar estos modelos de crecimiento y producción.

En 1999 se publicó un libro dedicado a estas herramientas selvícolas (Madrigal et al., 1999), en el que se incluyó un estudio detallado sobre la definición, clasificación, estructura, construcción e utilización práctica de las tablas de producción, además de una recopilación de las existentes hasta entonces en España y de otras extranjeras que podían ser de utilidad para algunas especies, a falta de tablas desarrolladas para ellas con datos recogidos en los montes españoles. En aquella recopilación únicamente se incluían dos tablas de producción realizadas con datos de rodales gallegos, ambas para *Eucalyptus globulus* (Fernández López, 1982, 1985), además de las antes mencionadas tablas que muestran diferentes alternativas selvícolas para *Pinus pinaster*, en las zonas costera e interior definidas para la especie en Galicia (ver apartado 1.3 y figura 1.13), generadas a partir del modelo dinámico desarrollado por Rodríguez Soalleiro (1995). Desde entonces, y afortunadamente, han sido numerosas las tablas de producción realizadas en Galicia y en España, para muchas especies de las que no se disponía de este tipo de información en 1999.

Las tablas de producción que se presentan en este capítulo para *Betula alba* y *Quercus robur* son una actualización de los primeros modelos de este tipo elaborados en España para dichas especies (Rojo et al., 2005, y Barrio-Anta, 2003, respectivamente), mientras que las de *Pseudotsuga menziesii* son las desarrolladas por López-Sánchez (2009) en su tesis doctoral, que también son las primeras tablas para la especie en España.

3.2.2. Clasificación de las tablas de producción

Aunque no resulta sencillo establecer una clasificación de las tablas de producción aplicable de forma inequívoca a todos los casos, siguiendo a Madrigal et al. (1999) se pueden diferenciar cuatro tipos, según el régimen selvícola considerado en su construcción:

- ✓ Tablas de producción de existencias normales o de producción normal.
- ✓ Tablas de producción de selvicultura media observada.
- ✓ Tablas de producción de selvicultura de referencia.
- ✓ Tablas de producción de selvicultura variable.

Las primeras tablas de producción, construidas en el siglo XIX en diversos Estados Alemanes, fueron las de existencias normales, cuyos ajustes se realizaban de forma gráfica o por tanteos,

tabulando después los resultados. Con ellas se trataba de caracterizar rodales regulares cuyo objetivo era maximizar la producción de madera por unidad de superficie, para lo que se construyeron a partir de los tradicionalmente denominados “rodales normales”, es decir, aquellos con un elevado número de pies y cuya evolución venía regulada por la mortalidad natural debida a la competencia.

Las tablas de producción de selvicultura media observada son aquellas que, como indica su nombre, reflejan la práctica selvícola habitual que realmente se está aplicando en los rodales de una determinada especie en un área geográfica concreta. Estas tablas sólo consideran un único régimen de claras, que suele ser de claras prudentes o moderadas, y no permiten ninguna alternativa salvo la elección del turno. Se construyen a partir de un inventario único de una red de parcelas de experimentación, que debe cubrir todas las posibles combinaciones de calidad de estación, edad y densidad que presente la especie a estudiar en un área definida. A partir de los datos del inventario se ajustan una serie de relaciones matemáticas (o relaciones fundamentales, ver apartado 3.2.4) entre las variables que intervienen en las tablas, que sirven para generar las mismas. Su construcción se basa en la aplicación de las leyes experimentales de Eichhorn, que indica la existencia de una relación directa entre la producción total de un rodal y su altura media independientemente de la calidad de estación, y de Assmann (1970), que establece la constancia de la producción total en volumen o área basimétrica dentro de un amplio abanico de regímenes de claras.

La gran mayoría de las tablas elaboradas en España en el siglo pasado son de este tipo, y actualmente se siguen elaborando tablas de producción de selvicultura media observada como primera herramienta de gestión cuando no se dispone de ninguna otra para estimar el crecimiento y producción de una especie (como es el caso de las tablas de *Betula alba*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur* que se presentan en este capítulo). Sin embargo, la necesidad de contar con modelos que permitieran elegir entre distintas alternativas selvícolas, incluyendo regímenes de claras fuertes, llevó a la construcción de tablas del siguiente tipo, a partir del final de la década de los ochenta del pasado siglo (Madrigal, 1991).

Las tablas de producción de selvicultura de referencia se elaboran a partir de las tablas de selvicultura media observada, incluyendo una alternativa selvícola en la que se intensifican las claras mediante una hipótesis sencilla de simulación, que casi siempre consiste en variar el valor del índice de Hart-Becking (ver apartado 3.3.3).

El último tipo de tablas de producción son las llamadas de selvicultura variable (o de densidad variable), que representan diversas opciones selvícolas, por lo que generalmente incluyen distintos regímenes de claras. Su construcción exige contar con datos de parcelas sometidas a distintos tratamientos selvícolas de claras, empleándose una metodología similar a la de las tablas de selvicultura media, pero agrupando las parcelas según tratamientos.

Una descripción detallada del desarrollo histórico de las tablas de producción en España se puede encontrar en el texto de Madrigal et al. (1999).

Según la clasificación comentada, las tablas de producción para rodales naturales de *Quercus robur* en Galicia que se presentan en este capítulo (que son una actualización de las

elaboradas por Barrio-Anta, 2003), así como las desarrolladas para las plantaciones gallegas de *Pinus radiata* (Sánchez, 2001; Sánchez et al., 2003) y de *Pinus sylvestris* (Martínez-Chamorro, 2004; 2007), son tablas de selvicultura media observada. En todas estas tablas se han agrupado las parcelas de la muestra en dos o tres grupos por su densidad, debido a la enorme dispersión encontrada en el número de pies por hectárea para cada edad, y se ha utilizado una ecuación diferente en cada grupo para describir la evolución de la densidad. Sin embargo, eso no implica que se puedan considerar como tablas de selvicultura variable, pues están basadas en la selvicultura realmente aplicada en los rodales inventariados, que no ha resultado muy homogénea, y además, al haberse construido con los datos de un solo inventario, se desconoce si los valores de densidad encontrados en cada parcela corresponden realmente a regímenes selvícolas diferentes (la densidad de un rodal a una determinada edad se puede alcanzar, generalmente, mediante la aplicación de muy diferentes tratamientos selvícolas).

En cuanto a las otras dos tablas de producción que se presentan en este capítulo, para rodales regulares de *Betula alba* en Galicia (que actualizan y sustituyen a las elaboradas anteriormente por Rojo et al., 2005) y para rodales regulares de *Pseudotsuga menziesii* (López-Sánchez, 2009) en España, se pueden considerar igualmente como tablas de producción de selvicultura media observada, a pesar de que en estos casos la evolución de la densidad no se ha obtenido de forma empírica, sino que es fruto de un supuesto teórico que se ha demostrado válido para un alto porcentaje de las parcelas de la muestra. Son, entonces, tablas más rígidas que las anteriores, pues sólo consideran un tipo determinado de claras (habitualmente moderadas), y la única elección posible es el turno de corta.

3.2.3. Variables de las tablas de producción

Las variables de rodal que normalmente se incluyen en una tabla de producción se pueden agrupar de la siguiente manera: variables de entrada, de la masa¹ principal antes de clara, de la masa extraída, de la masa principal después de clara, y de la masa total.

- ✓ Variables de entrada: son aquellas con las que se calcula el índice de sitio del rodal y, por tanto, la calidad de estación, que va a determinar la tabla de producción a utilizar. Son la edad t (años) y la altura dominante H_0 (m). La edad suele escalonarse en periodos de 5 (e incluso 3 ó 2) años para especies de crecimiento rápido, y de 10 años para especies de crecimiento más lento, y para cada una de esas edades se expresan el resto de variables dasométricas del rodal. Como definición de altura dominante habitualmente se utiliza una derivada de la propuesta por Assmann (1970), que considera como tal la altura media de los 100 pies más gruesos por hectárea, sin hacer uso de la curva de alturas de la masa para su determinación (ver apartado 2.1.6, anexo I y capítulo 7), aunque debe

¹ Se ha preferido mantener el nombre tradicional de “variables de masa” (principal antes y después de clara, extraída y total) por ser el tradicionalmente utilizado en España para las tablas de producción, pero debe entenderse, según la terminología utilizada en este libro, que se trata de variables de rodal (ver capítulo 1).

especificarse siempre el criterio adoptado. En cada una de las tablas existirán valores diferentes de edad-altura dominante, según las calidades de estación que se hayan definido.

- ✓ Variables de la masa principal antes y después del tratamiento: la masa principal es la que permanece en pie con dimensiones inventariables en un momento dado. Sus variables suelen ser el número de pies por hectárea N , el diámetro medio cuadrático d_g (cm), el área basimétrica G (m^2/ha) y el volumen V (m^3/ha , normalmente referido a troncos completos, aunque a veces se indican también los volúmenes hasta cierto diámetro en punta delgada; en ambos casos suelen ser valores de volumen con corteza). En ocasiones se incluyen otras como la altura media \bar{h} (m), el índice de Hart-Becking IH (%), el diámetro dominante d_0 (cm), el volumen unitario del árbol medio (dm^3), etc. A veces, en algunas tablas sólo se incluye la masa principal antes de la clara.
- ✓ Variables de la masa extraída: suelen ser todas o algunas de las anteriores, a las que siempre se añade el volumen extraído acumulado en las distintas claras V_{eac} (m^3/ha).
- ✓ Variables de la masa total: habitualmente son el volumen total con corteza V_t (m^3/ha), obtenido como suma del correspondiente a la masa principal después de la última clara más el extraído acumulado en las claras precedentes; y los crecimientos anuales medio C_m y corriente C_c de la masa total ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$). Aunque no es común, algunas tablas incluyen también el área basimétrica total (m^2/ha), suma de la correspondiente a la masa principal tras el tratamiento más la extraída en las claras precedentes.

3.2.4. Relaciones fundamentales

La estructura básica del modelo estático que da lugar a las tablas de producción está formada, al menos, por cuatro ecuaciones o funciones de salida, tradicionalmente denominadas relaciones fundamentales, que son las expresiones matemáticas que ligan entre sí a algunas de las variables que se acaban de reseñar. Las dos variables de rodal necesarias para inicializar el modelo estático son las antes denominadas variables de entrada: la edad y la altura dominante. La primera relación se corresponde con la ecuación que determina la calidad de estación, precisamente a partir de las dos variables de entrada mencionadas. El resto de funciones de salida o relaciones fundamentales permiten estimar el valor de otras variables requeridas para la gestión (p. ej., el número de pies por hectárea, el área basimétrica o el volumen). A continuación se describen las relaciones fundamentales más frecuentemente utilizadas para construir tablas de producción.

Primera relación fundamental: curvas de calidad de estación

Con las metodologías actuales de construcción de curvas de calidad de estación (ver capítulo 2), esta relación está formada por una única ecuación expresada en diferencias algebraicas que define conjuntamente, para una especie y zona geográfica, los modelos de

crecimiento en altura dominante y de índice de sitio: $H_{02} = f(t_2, t_1, H_{01})$, donde H_{02} y H_{01} son las alturas dominantes a las edades t_1 y t_2 , respectivamente.

La ecuación anterior permite obtener el índice de sitio IS a la edad de referencia t_{ref} elegida a partir de la altura H_{01} a la edad t_1 , con sólo reemplazar IS por H_{02} y t_{ref} por t_2 , quedando: $IS = f(t_{ref}, t_1, H_{01})$.

Por otro lado, se puede obtener la ecuación de crecimiento en altura dominante para un índice de sitio determinado reemplazando IS por H_{01} y t_{ref} por t_1 , resultando: $H_{02} = f(t_2, t_{ref}, IS)$.

Esta relación, en la que se fundamenta toda la construcción de las tablas, se considera independiente de la selvicultura seguida. Sin embargo, esto es cierto siempre que no se realicen claras por lo alto y se afecte a los 100 árboles más gruesos por hectárea que generalmente se emplean para determinar la altura dominante (ver apartado 2.1.6 y anexo I).

Habitualmente, y por razones prácticas, los rodales se clasifican en un número variable de clases de calidad de estación (clases de índice de sitio), que suelen oscilar entre tres y cinco, y como ya se ha comentado, se construye una tabla de producción diferente para cada clase de calidad (aunque en ocasiones no se construyen para las calidades inferiores, si en ellas no tiene sentido la producción por falta de rentabilidad). Esta forma de proceder presenta como inconveniente principal que el uso de las tablas requiere una asimilación de calidades para referir la del rodal en estudio a alguna de las de las tablas, lo que produce un error tanto mayor cuanto más diferente del valor medio representado en las tablas sea la calidad del rodal considerado. Para reducir este error se puede realizar una doble interpolación: entre edades dentro de una misma tabla y entre calidades entre diferentes tablas (ver Madrigal et al., 1991). Actualmente, gracias a la difusión de los ordenadores personales y a la disponibilidad de las ecuaciones que dan lugar a las tablas de producción, es posible construir de forma sencilla una tabla de producción específica para cada rodal de un monte si se conoce su índice de sitio, lo que evita tener que realizar las interpolaciones anteriores.

Segunda relación fundamental: evolución del número de pies del rodal en función de la altura dominante y/o edad

Las funciones utilizadas para describir esta relación suelen ser del tipo: $N = f(H_0)$, $N = f(t)$ o $N = f(t, H_0)$, donde N es el número de pies por hectárea, H_0 la altura dominante y t la edad.

El ajuste de cualquiera de ellas requiere de una cierta homogeneidad en los esquemas selvícolas seguidos en las parcelas que constituyen la muestra, pues de lo contrario se presentarán dificultades en la obtención de una ecuación que proporcione suficiente precisión en las estimaciones, y los resultados pueden carecer de valor práctico. Por ello, en ocasiones se clasifican previamente las parcelas de la muestra en varios niveles de densidad y se desarrollan tablas de producción para cada nivel.

Tercera relación fundamental: estimación del diámetro medio cuadrático en función de la altura dominante y/o la edad y/o el número de pies por hectárea

La tercera relación fundamental intenta predecir el diámetro medio cuadrático del rodal d_g en función de otras variables ya estimadas, como el número de pies por hectárea N , o variables medidas como la altura dominante H_0 y la edad t del rodal. Es decir, esta relación se puede describir mediante alguno de estos tipos de funciones: $d_g = f(H_0)$, $d_g = f(t)$, $d_g = f(t, H_0)$ o $d_g = f(H_0, N)$.

Igual que ocurre con la relación fundamental anterior, esta relación está fuertemente influenciada por la historia selvícola de los rodales medidos, aunque el hecho de que el número de pies por hectárea intervenga como variable independiente hace que, habitualmente, no sea necesario agrupar las parcelas por niveles de densidad y realizar un ajuste independiente con cada uno de ellos para obtener buenos resultados.

Cuarta relación fundamental: estimación del volumen del rodal en función de otras variables dasométricas

Esta relación suele expresarse mediante funciones como: $V = f(G, H_0)$ o $V = f(d_g, H_0, N)$, y permite estimar el volumen de madera de un rodal V a partir de variables de entrada como el área basimétrica G , el diámetro medio cuadrático d_g , el número de pies por hectárea N y las alturas dominante H_0 o media \bar{h} del rodal. Es importante señalar a qué volumen se refiere la ecuación y, por tanto, la tabla (volumen hasta el ápice o hasta un determinado diámetro en punta delgada, con o sin corteza).

Otras relaciones fundamentales

En ocasiones las tablas presentan relaciones fundamentales adicionales, como la que permite estimar el volumen V_i hasta un determinado diámetro límite en punta delgada d_i , que suele ser del tipo: $V_i = f(V, d_g, d_i)$, donde V es el volumen del rodal y d_g su diámetro medio cuadrático.

También es posible incluir una ecuación para estimar la altura media \bar{h} del rodal en función de su altura dominante H_0 y alguna otra variable del rodal, como el número de pies por hectárea N : $\bar{h} = f(H_0)$ o $\bar{h} = f(H_0, N)$.

3.2.5. Datos

La construcción de los modelos estáticos de crecimiento y producción de *Betula alba* y *Quercus robur* que se presentan en este capítulo se ha basado en los datos procedentes de la primera medición de las redes de parcelas de crecimiento establecidas por el grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela, en rodales regulares de las dos especies repartidos por toda su área de distribución

en Galicia, que se han descrito en el capítulo 1. Por su parte, el modelo estático de *Pseudotsuga menziesii* se ha construido con datos de la red de parcelas establecida por la UXFS y con datos del primer inventario de 54 parcelas temporales instaladas en Girona en 1996 y 1997 por el Departamento de Producción Vegetal y Ciencia Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria de Lleida en rodales regulares de dicha especie. Así, se ha contado con 125 parcelas de experimentación de *Betula alba*, 164 parcelas de *Pseudotsuga menziesii* y 172 parcelas de *Quercus robur*, en este último caso todas correspondientes a rodales de regeneración natural. En la tabla 3.1 se muestran los estadísticos descriptivos de las principales variables de rodal empleadas en la elaboración de los modelos.

Además, se ha contado con una muestra de árboles dominantes para la elaboración de las curvas de calidad de estación (ver capítulo 2) y de otros árboles de las clases sociológicas inferiores para el desarrollo de tarifas de cubicación de árbol individual (ver capítulo 8).

Tabla 3.1. Estadísticos descriptivos de la muestra de parcelas empleadas en la elaboración de los modelos estáticos de crecimiento y producción para *Betula alba*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica
<i>Betula alba</i>	<i>N</i>	1.769	390	6.000	1.192
	<i>G</i>	24,1	3,3	66,5	11,2
	<i>d_g</i>	14,1	7,4	23,2	3,6
	<i>H₀</i>	14,6	7,2	23,8	3,6
	\bar{h}	12,9	6,5	21,9	3,2
	<i>V</i>	140	13	567	88
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>N</i>	838	280	2.128	370
	<i>G</i>	36,7	4,4	68,8	12,7
	<i>d_g</i>	24,9	8,4	49,2	7,4
	<i>H₀</i>	19,9	6,5	34,4	5,4
	\bar{h}	17,6	5,4	28,0	5,1
	<i>V</i>	315	16	782	142
<i>Quercus robur</i>	<i>N</i>	874	302	3.022	482
	<i>G</i>	28,3	3,4	72,9	9,2
	<i>d_g</i>	21,9	8,6	40,0	6,1
	<i>H₀</i>	17,0	7,2	25,6	3,3
	\bar{h}	14,5	5,3	23,7	3,3
	<i>V</i>	216	24	574	90

Nota: *N* = número de pies por hectárea; *G* = área basimétrica (m²/ha); *d_g* = diámetro medio cuadrático (cm); *H₀* = altura dominante (m); \bar{h} = altura media (m); *V* = volumen (m³/ha).

3.2.6. Metodología utilizada para elaborar las tablas de producción

En Madrigal et al. (1999) puede encontrarse una detallada descripción de la metodología que se utiliza habitualmente para elaborar tablas de producción, que básicamente consiste en el ajuste y posterior aplicación de las comentadas relaciones fundamentales para calcular el valor de las distintas variables de rodal a cada una de las edades consideradas en las tablas. Para construir

las tablas que se presentan en este libro se ha seguido y adaptado dicha metodología, tal como se describe a continuación.

Variables de entrada

- ✓ La edad t (años) es la primera variable que aparece siempre en las tablas. En el caso de las tablas de *Betula alba* y de *Pseudotsuga menziesii* la edad se ha escalonado en períodos de 5 años, mientras que en las de *Quercus robur* se muestran los valores de las variables cada 10 años, al considerarse una especie de crecimiento más lento y, por tanto, de un mayor turno. El resto de las variables se ha calculado, entonces, para cada una de las edades que aparecen en cada tabla.
- ✓ La altura dominante H_0 (m) se ha calculado para cada una de las edades definidas en el paso anterior mediante la relación $H_{02} = f(t_2, t_{ref}, IS)$. Para ello, ha sido necesario fijar previamente el valor del índice de sitio IS a su edad de referencia asociada t_{ref} para cada clase de calidad de estación considerada. Las ecuaciones de calidad de estación utilizadas han sido las correspondientes a los trabajos de Diéguez-Aranda et al. (2006) para *Betula alba*, López-Sánchez (2009) para *Pseudotsuga menziesii*, y Barrio-Anta y Diéguez-Aranda (2005) para *Quercus robur* (ver capítulo 2).

Variables de la masa principal antes de clara

- ✓ El número de pies por hectárea antes de clara N se ha estimado con la ecuación que liga esta variable con la altura dominante H_0 , y que representa la segunda relación fundamental: $N = f(H_0)$. En las tablas de producción de *Betula alba* y de *Pseudotsuga menziesii* la evolución de la densidad no se ha obtenido con una ecuación empírica, sino que es fruto de un supuesto teórico que se ha demostrado válido para un alto porcentaje de las parcelas de las muestras empleadas.
- ✓ En el caso de las tablas de *Quercus robur*, a partir del número de pies por hectárea de la masa principal antes de clara N y de la altura dominante H_0 se podría determinar la altura media de la masa principal \bar{h} (m), empleando la relación fundamental que permite estimar esta variable: $\bar{h} = f(H_0, N)$.
- ✓ El diámetro medio cuadrático de la masa principal antes de clara d_g (cm) se ha estimado empleando la ecuación obtenida en la tercera relación fundamental: $d_g = f(H_0, N)$.
- ✓ El cálculo del área basimétrica G (m²/ha) ha sido inmediato a partir de los valores de d_g y N , empleando la siguiente expresión:

$$G = \frac{\pi}{40.000} \cdot d_g^2 \cdot N \quad [3.1]$$

- ✓ El volumen de la masa principal antes de clara V (m³/ha) se ha estimado a partir de las ecuaciones de volumen obtenidas mediante la cuarta relación fundamental:

$V = f(d_g, H_0, N)$. En el caso de las tablas de *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur* se podrían incluir, además, diferentes volúmenes comerciales V_i (hasta un determinado diámetro límite de utilización d_i), calculados a partir de sendas ecuaciones que permiten estimar dichos volúmenes como un porcentaje del volumen hasta el ápice, realizadas por López-Sánchez (2009) y Barrio-Anta (2003) respectivamente: $V_i = V \cdot f(d_g, d_i)$.

Variables de la masa extraída y de la masa principal después de clara

- ✓ N_e es el número de pies por hectárea extraídos, que se ha calculado para cada edad t por diferencia entre los valores de N antes de clara a las edades t y $t+5$, en las tablas de *Betula alba* y *Pseudotsuga menziesii*, y a las edades t y $t+10$ en el caso de *Quercus robur*. El número de pies por hectárea de la masa principal después de clara N_p a una edad t es, entonces, la diferencia entre N y N_e , por lo que coincide con el valor de N antes de clara a la edad $t+5$ para *Betula alba* y *Pseudotsuga menziesii*, y a la edad $t+10$ para *Quercus robur*. Para proceder de esta forma se asume que no existe mortalidad en el intervalo entre edades (o, lo que es lo mismo, que los pies muertos se incluyen en los extraídos).
- ✓ El diámetro medio cuadrático después de clara d_{gp} (cm) se ha estimado con la tercera relación fundamental descrita para la masa principal antes de clara, pero en este caso a partir del número de pies por hectárea después de clara N_p y asumiendo la hipótesis de que la clara no afecta al estrato dominante y, por tanto, las alturas dominantes antes y después de clara coinciden: $d_{gp} = f(H_0, N_p)$.
- ✓ El área basimétrica después de clara G_p (m²/ha) se ha calculado directamente a partir de los valores de d_{gp} y N_p , empleando la siguiente expresión:

$$G_p = \frac{\pi}{40.000} \cdot d_{gp}^2 \cdot N_p \quad [3.2]$$

- ✓ El área basimétrica de la masa extraída G_e (m²/ha) se ha obtenido por diferencia entre G y G_p .
- ✓ El volumen de la masa principal después de clara V_p (m³/ha) se ha calculado empleando las mismas ecuaciones obtenidas y mencionadas al tratar de la masa principal antes de clara para la cuarta relación fundamental en cada especie, pero incluyendo ahora las variables de después de clara como predictoras. El volumen extraído V_e (m³/ha) se ha determinado por diferencia entre los volúmenes de la masa principal antes V y después V_p de clara. La variable V_{eac} (m³/ha) es el volumen extraído acumulado en las distintas claras hasta una determinada edad.

Variables de la masa total

- ✓ El volumen de la masa total para cada edad V_t (m^3/ha) se ha calculado sumando los valores del volumen de la masa principal después de clara V_p y del volumen extraído acumulado en las claras realizadas hasta esa edad V_{eac} .
- ✓ El crecimiento medio anual de la masa total C_m ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) se ha determinado dividiendo el volumen de la masa total V_t por la edad t .
- ✓ El crecimiento corriente de la masa total C_c ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), para una edad t , se ha obtenido dividiendo por 5 años la diferencia entre los volúmenes totales V_t a las edades t y $t-5$ en las tablas de *Betula alba* y *Pseudotsuga menziesii*, y dividiendo por 10 años la diferencia de esos volúmenes totales V_t a las edades t y $t-10$ en las de *Quercus robur*.

3.2.7. Resultados

Tablas de producción para *Betula alba* en Galicia

En la tabla 3.2 se muestran las expresiones finalmente ajustadas de las funciones elegidas para describir las relaciones fundamentales de las tablas de producción para *Betula alba* en Galicia. Todas las estimaciones de los parámetros han resultado significativas al nivel del 5%. También se incluyen los valores de los correspondientes estadísticos de bondad del ajuste, el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), cuyo significado y expresión pueden consultarse en el anexo II.

Ya se ha comentado que para el ajuste de la segunda relación fundamental es necesaria una cierta homogeneidad en los esquemas selvícolas seguidos en las parcelas que constituyen la muestra, para poder obtener ecuaciones precisas y de utilidad práctica. Al representar gráficamente el número de pies por hectárea de cada parcela frente a su altura dominante y edad se han observado nubes de puntos muy dispersas y sin tendencias claras, incluso aunque se agruparan las parcelas en función del índice de Hart-Becking (en este caso asumiendo una distribución de los árboles al tresbolillo, ver apartado 3.3.3). Por tal motivo, se ha optado por utilizar la “norma teórica” de evolución del número de pies por hectárea propuesta por Rojo et al. (2005).

Las tablas que se presentan en este libro sustituyen a las elaboradas por Rojo et al. (2005) para la especie, ya que se han modificado el resto de relaciones fundamentales que utilizaron dichos autores. Así, se ha actualizado la primera relación fundamental con el estudio de calidad de estación realizado por Diéguez-Aranda et al. (2006) (ver capítulo 2), y se han vuelto a ajustar las funciones correspondientes a la tercera y cuarta relaciones fundamentales.

En la figura 3.2 se muestran esas mencionadas curvas de calidad de estación, para unos índices de sitio de 7, 11 y 15 m a la edad de referencia de 20 años, y sus correspondientes clases de calidad. En la tabla 3.3 se presentan las tablas de producción de silvicultura media observada de la especie para cada una de las calidades.

Tabla 3.2. Resumen de las relaciones fundamentales que constituyen las tablas de producción para *Betula alba* en Galicia.

Primera relación fundamental: $H_0 = f(IS, t)$	R^2	REMC
$H_{02} = \frac{19,80 + X_0}{1 + 758,0/X_0 \cdot t_2^{-1,398}}$ <p>donde $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left(H_{01} - 19,80 + \sqrt{(19,80 - H_{01})^2 + 4 \cdot 758,0 \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,398}} \right)$</p>	0,989	0,505 m
Segunda relación fundamental: $N = f(H_0)$	R^2	REMC
$N = 78.426 \cdot H_0^{-1,600}$		Norma teórica
Tercera relación fundamental: $d_g = f(H_0, N)$	R^2	REMC
$d_g = 13,86 \cdot N^{-0,2721} \cdot H_0^{0,7400}$	0,840	1,46 cm
Cuarta relación fundamental: $V = f(d_g, H_0, N)$	R^2	REMC
$V = 3,898 \cdot 10^{-5} \cdot d_g^{2,219} \cdot H_0^{0,6523} \cdot N^{1,015}$	0,990	8,81 m³/ha

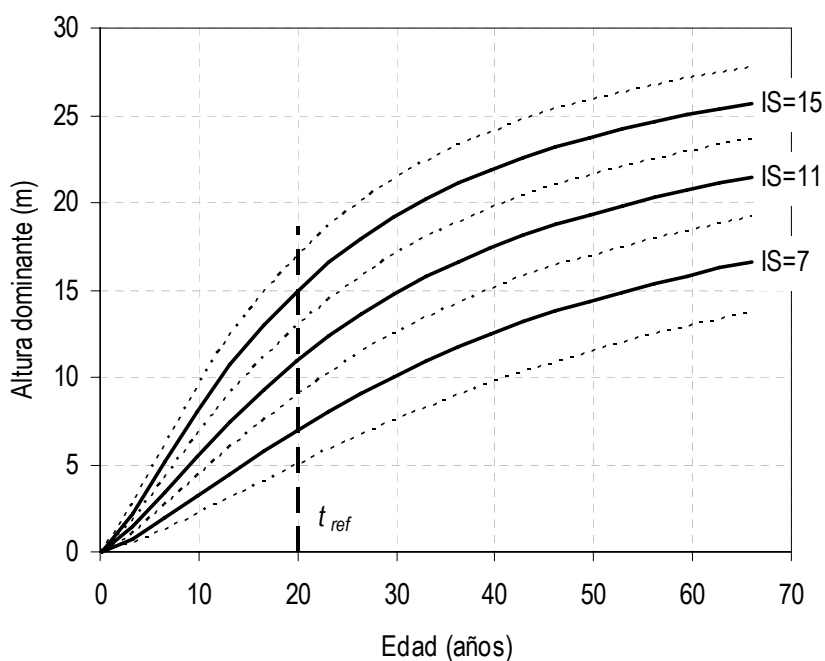


Figura 3.2. Curvas de calidad de estación para *Betula alba* en Galicia, correspondientes a índices de sitio de 7, 11 y 15 m a una edad de referencia de 20 años (línea gruesa continua) y clases de calidad de estación definidas a partir de ellos (delimitadas por líneas a trazos).

Tabla 3.3. Tablas de producción para *Betula alba* en Galicia, correspondientes a índices de sitio de 7, 11 y 15 m a la edad de referencia de 20 años.

IS = 7 m																
Variables entrada		Masa principal antes de clara					Masa extraída			Masa principal después de clara				Masa total		
<i>t</i>	<i>H</i> ₀	<i>N</i>	<i>d</i> _g	<i>G</i>	<i>V</i>	<i>N</i> _e	<i>G</i> _e	<i>V</i> _e	<i>V</i> _{eac}	<i>N</i> _p	<i>d</i> _{gp}	<i>G</i> _p	<i>V</i> _p	<i>V</i> _t	<i>C</i> _m	<i>C</i> _c
20	7,0	3486	6,4	11,1	33,1	1003	1,6	4,3	4,3	2482	7,0	9,5	28,8	33,1	1,7	--
25	8,7	2482	8,2	13,0	46,9	551	1,4	4,6	8,9	1931	8,7	11,6	42,3	51,2	2,0	3,6
30	10,1	1931	9,8	14,6	60,6	339	1,2	4,6	13,5	1593	10,3	13,4	56,0	69,5	2,3	3,7
35	11,4	1593	11,3	16,0	73,8	225	1,1	4,5	18,0	1368	11,8	14,9	69,3	87,3	2,5	3,6
40	12,6	1368	12,6	17,2	86,2	158	0,9	4,2	22,2	1210	13,1	16,2	82,0	104,2	2,6	3,4
45	13,6	1210	13,8	18,2	97,7	116	0,8	4,0	26,2	1094	14,2	17,4	93,7	119,9	2,7	3,1
50	14,4	1094	14,9	19,1	108,3	88	0,7	3,7	29,9	1006	15,2	18,3	104,6	134,5	2,7	2,9
55	15,2	1006	15,8	19,8	118,0	69	0,6	3,4	33,2	938	16,1	19,2	114,6	147,8	2,7	2,7
60	15,9	938	16,7	20,5	126,8	55	0,6	3,1	36,3	883	17,0	19,9	123,7	160,0	2,7	2,4
65	16,5	883	17,4	21,1	134,9	45	0,5	2,8	39,2	838	17,7	20,6	132,0	171,2	2,6	2,2
70	17,1	838	18,1	21,6	142,2											
IS = 11 m																
15	8,5	2564	8,0	12,8	45,3	872	2,2	7,1	7,1	1691	8,9	10,6	38,2	45,3	3,0	--
20	11,0	1691	10,8	15,5	69,4	413	1,9	7,6	14,7	1278	11,7	13,7	61,8	76,5	3,8	6,2
25	13,1	1278	13,3	17,7	92,4	232	1,5	7,3	22,0	1046	14,0	16,2	85,1	107,1	4,3	6,1
30	14,9	1046	15,4	19,5	113,4	145	1,3	6,8	28,7	901	16,0	18,2	106,7	135,4	4,5	5,7
35	16,3	901	17,2	20,9	132,1	98	1,1	6,1	34,8	803	17,7	19,8	126,0	160,9	4,6	5,1
40	17,5	803	18,7	22,0	148,6	70	0,9	5,4	40,3	734	19,2	21,1	143,2	183,4	4,6	4,5
45	18,5	734	20,0	23,0	163,0	52	0,8	4,8	45,1	682	20,4	22,2	158,2	203,3	4,5	4,0
50	19,4	682	21,1	23,8	175,6	40	0,6	4,3	49,3	642	21,4	23,1	171,4	220,7	4,4	3,5
55	20,1	642	22,0	24,5	186,7	31	0,5	3,8	53,1	611	22,3	23,9	182,9	236,0	4,3	3,1
60	20,8	611	22,8	25,0	196,4	25	0,5	3,4	56,5	586	23,1	24,6	193,1	249,6	4,2	2,7
65	21,3	586	23,6	25,5	205,0	21	0,4	3,0	59,5	566	23,8	25,1	202,0	261,5	4,0	2,4
70	21,8	566	24,2	26,0	212,6											
IS = 15 m																
10	8,2	2726	7,6	12,4	42,6	1248	3,0	9,5	9,5	1478	9,0	9,4	33,1	42,6	4,3	--
15	12,0	1478	11,9	16,5	79,6	449	2,5	11,0	20,5	1030	13,2	14,0	68,6	89,1	5,9	9,3
20	15,0	1030	15,6	19,6	115,3	217	2,0	10,7	31,1	813	16,6	17,6	104,6	135,7	6,8	9,3
25	17,4	813	18,5	21,9	146,8	123	1,6	9,6	40,8	690	19,4	20,3	137,1	177,9	7,1	8,4
30	19,3	690	20,9	23,7	173,7	78	1,3	8,4	49,1	611	21,6	22,4	165,3	214,4	7,1	7,3
35	20,8	611	22,8	25,0	196,4	53	1,0	7,2	56,3	558	23,4	24,0	189,2	245,5	7,0	6,2
40	22,0	558	24,4	26,1	215,5	38	0,8	6,2	62,5	520	24,9	25,3	209,4	271,9	6,8	5,3
45	23,0	520	25,7	27,0	231,7	28	0,7	5,3	67,8	492	26,1	26,3	226,4	294,2	6,5	4,5
50	23,8	492	26,8	27,7	245,5	22	0,6	4,6	72,4	470	27,1	27,2	240,9	313,3	6,3	3,8
55	24,5	470	27,7	28,3	257,2	17	0,5	4,0	76,4	452	28,0	27,9	253,2	329,6	6,0	3,3
60	25,1	452	28,5	28,8	267,3	14	0,4	3,4	79,8	438	28,7	28,4	263,9	343,7	5,7	2,8
65	25,6	438	29,2	29,3	276,1	12	0,4	3,0	82,8	427	29,4	28,9	273,1	355,9	5,5	2,4
70	26,0	427	29,7	29,6	283,7											

Nota: *IS* = índice de sitio (m); *t* = edad (años); *H*₀ = altura dominante (m); *N* = pies/ha; *d*_g = diámetro medio cuadrático (cm); *G* = área basimétrica (m²/ha); *V* = volumen (m³/ha); los subíndices *e* y *p* hacen referencia a las variables anteriores, pero para la masa extraída y la masa después de clara respectivamente; *V*_{eac} = volumen extraído acumulado en las claras (m³/ha); *V*_t = volumen de la masa total (m³/ha); *C*_m = crecimiento medio anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹); *C*_c = crecimiento corriente anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹).

Tablas de producción para *Pseudotsuga menziesii* en España

En la tabla 3.4 se muestran las expresiones finalmente ajustadas para las relaciones fundamentales de las tablas de producción para *Pseudotsuga menziesii* en España. Todas las estimaciones de los parámetros que se han incluido son significativas a un nivel del 5%. También se incluyen los valores de los correspondientes estadísticos de bondad del ajuste, el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), cuyo significado y expresión pueden consultarse en el anexo II.

Tabla 3.4. Resumen de las relaciones fundamentales que constituyen las tablas de producción para *Pseudotsuga menziesii* en España.

Primera relación fundamental: $H_0 = f(IS, t)$	R^2	REMC
$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{1 - \exp(-0,05221 \cdot t_2)}{1 - \exp(-0,05221 \cdot t_1)} \right)^{(-9,568 + 40,49/X_0)}$ <p>donde</p> $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left((\ln H_{01} + 9,568 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln H_{01} + 9,568 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 40,49 \cdot L_0} \right)$ <p>y $L_0 = \ln(1 - \exp(-0,05221 \cdot t_1))$</p>	0,996	0,417 m
Segunda relación fundamental: $N = f(H_0)$	R^2	REMC
$20\% = \frac{10.000}{\sqrt{N} \cdot H_0} \Rightarrow N = \left(\frac{10.000}{20 \cdot H_0} \right)^2$		Norma teórica
Tercera relación fundamental: $d_g = f(H_0, N)$	R^2	REMC
$d_g = 22,83 \cdot N^{-0,2915} \cdot H_0^{0,6720}$	0,820	3,04 cm
Cuarta relación fundamental: $V = f(d_g, H_0, N)$	R^2	REMC
$V = 5,599 \cdot 10^{-5} \cdot d_g^{2,047} \cdot H_0^{0,7592} \cdot N^{1,002}$	0,991	14,8 m³/ha
Otras relaciones: $V_i = f(V, d_g, d_i)$	R^2	REMC
$V_i = V \cdot \exp(-0,04870 \cdot d_g^{-3,118} \cdot d_i^{4,062})$	0,991	14,8 m³/ha

Nota: el ajuste de las ecuaciones $V = b_0 \cdot d_g^{b_1} \cdot H_0^{b_2} \cdot N^{b_3}$ y $V_i = V \cdot \exp(b_4 \cdot d_g^{b_5} \cdot d_i^{b_6})$ se ha realizado en un único paso como $V_i = b_0 \cdot d_g^{b_1} \cdot H_0^{b_2} \cdot N^{b_3} \cdot \exp(b_4 \cdot d_g^{b_5} \cdot d_i^{b_6})$, por lo que los valores de los estadísticos de bondad del ajuste son iguales.

Como en el caso de *Betula alba*, los gráficos que representan la evolución de la densidad con la edad o la altura dominante han mostrado una gran dispersión, indicando que el estado selvícola de las masas de *Pseudotsuga menziesii* en España es muy heterogéneo. Esta heterogeneidad no ha permitido ajustar una relación para estimar la evolución de la densidad con la precisión requerida, motivo por el cual se ha decidido fijar un valor inicial de densidad de 1.800 pies/ha (a partir de los valores observados en las parcelas de estudio) y mantener constante el índice de Hart-Becking (en este caso asumiendo una distribución de los árboles en marco real, ver apartado 3.3.3) en un valor del 20%, por ser representativo de lo que, como media se está realizando en los rodales de *Pseudotsuga menziesii* en España.

En la figura 3.3 se muestran las curvas de calidad de estación, correspondientes a índices de sitio de 11, 15 y 19 m (a una edad de referencia de 20 años), y las clases de calidad de estación establecidas a partir de ellos. En la tabla 3.5 se presentan las tablas de producción para cada uno de estos índices de sitio.

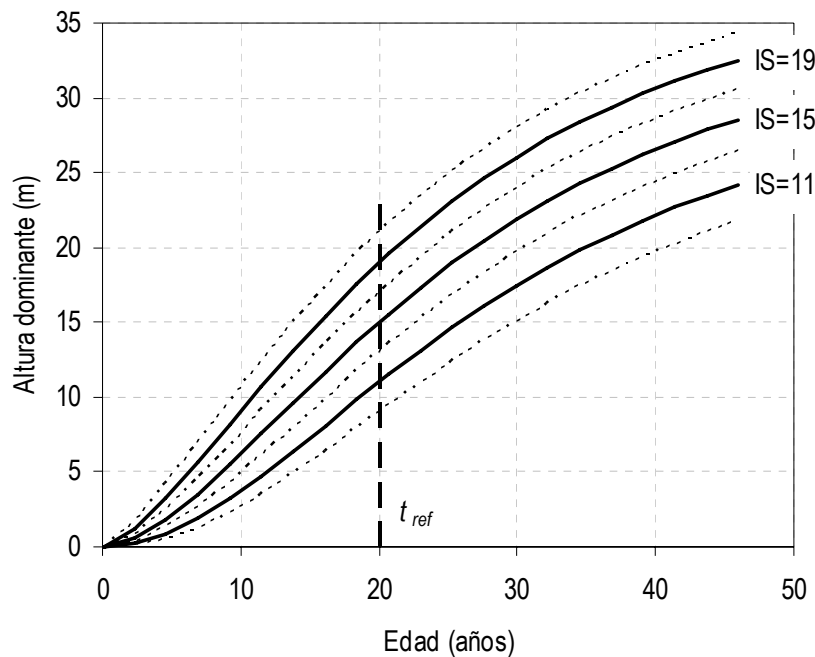


Figura 3.3. Curvas de calidad de estación para *Pseudotsuga menziesii* en España, correspondientes a índices de sitio de 11, 15 y 19 m a una edad de referencia de 20 años (línea gruesa continua) y clases de calidad de estación definidas a partir de ellos (delimitadas por líneas a trazos).

Tabla 3.5. Tablas de producción para *Pseudotsuga menziesii* en España, correspondientes a índices de sitio de 11, 15 y 19 m a la edad de referencia de 20 años.

IS = 11 m																
Variables entrada		Masa principal antes de clara					Masa extraída				Masa principal después de clara				Masa total	
<i>t</i>	<i>H₀</i>	<i>N</i>	<i>d_g</i>	<i>G</i>	<i>V</i>	<i>N_e</i>	<i>G_e</i>	<i>V_e</i>	<i>V_{ea}</i>	<i>N_p</i>	<i>d_{gp}</i>	<i>G_p</i>	<i>V_p</i>	<i>V_t</i>	<i>C_m</i>	<i>C_c</i>
5	1,0	1800	2,6	0,9	0,7	0	0,0	0,0	0,0	1800	2,6	0,9	0,7	0,7	0,1	--
10	3,7	1800	6,2	5,5	11,7	0	0,0	0,0	0,0	1800	6,2	5,5	11,7	11,7	1,2	2,2
15	7,3	1800	9,8	13,5	49,1	0	0,0	0,0	0,0	1800	9,8	13,5	49,1	49,1	3,3	7,5
20	11,0	1800	12,9	23,4	117,9	603	3,7	18,0	18,0	1197	14,5	19,7	99,9	117,9	5,9	13,8
25	14,5	1197	17,4	28,5	179,0	379	4,2	25,6	43,6	818	19,5	24,3	153,4	197,0	7,9	15,8
30	17,5	818	22,1	31,4	230,3	196	3,4	24,2	67,7	622	23,9	28,0	206,1	273,9	9,1	15,4
35	20,0	622	26,2	33,7	276,0	113	2,7	21,5	89,2	509	27,8	31,0	254,5	343,8	9,8	14,0
40	22,2	509	29,8	35,4	315,1	70	2,1	18,4	107,7	439	31,1	33,3	296,7	404,4	10,1	12,1
45	23,9	439	32,7	36,8	347,7	46	1,7	15,3	123,0	393	33,7	35,1	332,4	455,3	10,1	10,2
50	25,2	393	35,0	37,8	374,2											
IS = 15 m																
5	2,1	1800	4,2	2,5	3,4	0	0,0	0,0	0,0	1800	4,2	2,5	3,4	3,4	0,7	--
10	6,2	1800	8,7	10,8	34,6	0	0,0	0,0	0,0	1800	8,7	10,8	34,6	34,6	3,5	6,2
15	10,7	1800	12,6	22,6	111,7	689	4,1	19,8	19,8	1111	14,6	18,5	91,9	111,7	7,4	15,4
20	15,0	1111	18,2	29,0	188,0	400	4,9	31,1	50,9	711	20,8	24,1	156,9	207,8	10,4	19,2
25	18,8	711	24,1	32,5	252,6	190	4,0	29,9	80,9	521	26,4	28,6	222,7	303,6	12,1	19,1
30	21,9	521	29,3	35,2	310,4	104	3,1	26,9	107,8	417	31,3	32,1	283,5	391,3	13,0	17,5
35	24,5	417	33,8	37,3	359,9	63	2,5	23,1	130,9	354	35,4	34,8	336,8	467,7	13,4	15,3
40	26,6	354	37,4	38,9	401,1	40	1,9	19,3	150,1	313	38,8	37,0	381,8	531,9	13,3	12,9
45	28,2	313	40,4	40,1	434,7	27	1,5	15,7	165,8	286	41,4	38,6	418,9	584,8	13,0	10,6
50	29,6	286	42,7	41,0	461,6											
IS = 19 m																
5	3,7	1800	6,2	5,4	11,4	0	0,0	0,0	0,0	1800	6,2	5,4	11,4	11,4	2,3	--
10	9,1	1800	11,3	18,1	78,5	588	2,8	11,6	11,6	1212	12,7	15,4	66,8	78,5	7,8	13,4
15	14,4	1212	17,3	28,4	177,5	519	5,9	36,0	47,6	693	20,3	22,5	141,5	189,1	12,6	22,1
20	19,0	693	24,5	32,7	257,1	215	4,7	36,0	83,6	477	27,4	28,0	221,1	304,7	15,2	23,1
25	22,9	477	31,0	36,0	328,9	109	3,7	32,8	116,5	368	33,4	32,3	296,1	412,6	16,5	21,6
30	26,1	368	36,5	38,5	390,6	63	2,9	28,4	144,9	306	38,5	35,6	362,2	507,1	16,9	18,9
35	28,6	306	41,0	40,3	441,9	39	2,2	23,8	168,7	267	42,7	38,1	418,1	586,8	16,8	15,9
40	30,6	267	44,7	41,8	483,7	26	1,7	19,4	188,1	241	46,0	40,0	464,3	652,4	16,3	13,1
45	32,2	241	47,6	42,9	517,2	18	1,3	15,7	203,8	223	48,7	41,5	501,6	705,3	15,7	10,6
50	33,5	223	49,9	43,7	543,8											

Nota: *IS* = índice de sitio (m); *t* = edad (años); *H₀* = altura dominante (m); *N* = pies/ha; *d_g* = diámetro medio cuadrático (cm); *G* = área basimétrica (m²/ha); *V* = volumen (m³/ha); los subíndices *e* y *p* hacen referencia a las variables anteriores, pero para la masa extraída y la masa después de clara respectivamente; *V_{ea}* = volumen extraído acumulado en las claras (m³/ha); *V_t* = volumen de la masa total (m³/ha); *C_m* = crecimiento medio anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹); *C_c* = crecimiento corriente anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹).

Tablas de producción para *Quercus robur* en Galicia

En la tabla 3.6 se muestran las expresiones finalmente ajustadas para las relaciones fundamentales de las tablas de producción para *Quercus robur* en Galicia. Todas las estimaciones de los parámetros que se han incluido son significativas a un nivel del 5%.

Tabla 3.6. Resumen de las relaciones fundamentales que constituyen las tablas de producción para *Quercus robur* en Galicia.

Primera relación fundamental: $H_0 = f(IS, t)$	R^2	REMC
$H_0 = 129,0 \cdot \left(\frac{IS}{129,0} \right)^{(60/t)^{0,3019}}$	0,972	0,980 m
Segunda relación fundamental: $N = f(H_0)$	R^2	REMC
$N = 1,030 \cdot \exp(12,59) \cdot H_0^{-2,007}$ Parcelas de alta densidad ($IH < 23,3\%$)	0,708	241 pies/ha
$N = 1,019 \cdot \exp(11,33) \cdot H_0^{-1,782}$ Parcelas de baja densidad ($IH > 23,3\%$)	0,756	152 pies/ha
Tercera relación fundamental: $d_g = f(H_0, N)$	R^2	REMC
$d_g = 33,66 \cdot N^{-0,3307} \cdot H_0^{0,6185}$	0,864	0,960 cm
Cuarta relación fundamental: $V = f(d_g, H_0, N)$	R^2	REMC
$V = 6,733 \cdot 10^{-5} \cdot d_g^{1,872} \cdot H_0^{0,9039} \cdot N$	0,984	11,4 m ³ /ha
Otras relaciones: $V_i = f(V, d_g, d_i)$	R^2	REMC
$V_i = V \cdot \exp(-0,2289 \cdot d_g^{-2,565} \cdot d_i^{2,958})$	0,981	11,5 m ³ /ha
Otras relaciones: $\bar{h} = f(H_0, N)$	R^2	REMC
$\bar{h} = -29,49 + 0,8407 \cdot H_0 + \frac{36,34}{N^{0,03}}$	0,855	1,25 m

Al igual que en los dos casos anteriores, ha sido necesario homegeneizar los datos de número de pies por hectárea existentes en las parcelas de *Quercus robur* de la muestra utilizada, pues al representar gráficamente el número de pies por hectárea frente a la altura dominante o a la edad de las parcelas se ha observado también una nube muy dispersa y sin tendencias claras. Se ha examinado, entonces, el valor medio del índice de Hart-Becking de las parcelas (en este caso asumiendo una distribución de los árboles al tresbolillo, ver apartado 3.3.3), que ha resultado del 23,3%. Teniendo en cuenta este valor medio se ha procedido a dividir la totalidad de las parcelas en dos grupos: el primero se ha formado con las parcelas con un valor del índice de Hart-Becking por encima de la media (considerándose parcelas de densidad baja), y el segundo

grupo con las parcelas con un índice de Hart-Becking por debajo de la media (considerándose parcelas de densidad alta). Una vez agrupadas de esta manera las parcelas se ha procedido a ajustar para cada grupo una ecuación que relacione la densidad únicamente con la altura dominante, puesto que en masas naturales, como corresponde a la totalidad de los rodales de la especie utilizados en la muestra, es difícil contar con datos fiables de edad. A pesar de la consideración de dos niveles de densidad, y tal como se ha comentado en un apartado anterior, las tablas de producción para *Quercus robur* en Galicia que se presentan en este libro se pueden considerar de silvicultura media observada, según la clasificación indicada anteriormente.

Además, estas tablas son una actualización de las elaboradas para la especie en Galicia por Barrio-Anta (2003), ya que se han modificado algunas de las relaciones fundamentales, como la primera, correspondiente al estudio de calidad de estación, para la cual se ha utilizado la ecuación obtenida por Barrio-Anta y Diéguez-Aranda (2005) (ver capítulo 2), y se han reajustado de nuevo la tercera y cuarta relaciones fundamentales.

En la figura 3.4 se muestran las mencionadas curvas de calidad de estación, correspondientes a índices de sitio de 10, 15 y 20 m, y las clases de calidad de estación establecidas a partir de ellos. En las tablas 3.7 y 3.8 se presentan las tablas de producción para cada uno de estos índices de sitio y para los dos niveles de densidad (alta y baja) definidos en el trabajo de Barrio-Anta (2003).

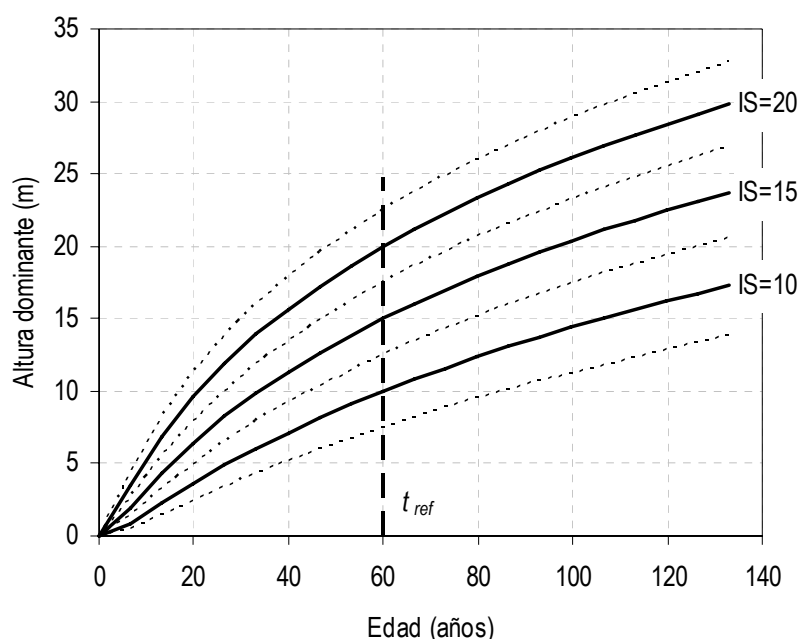


Figura 3.4. Curvas de calidad de estación para *Quercus robur* en Galicia, correspondientes a índices de sitio de 10, 15 y 20 m a una edad de referencia de 60 años (línea gruesa continua) y clases de calidad de estación definidas a partir de ellos (delimitadas por líneas a trazos).

Tabla 3.7. Tablas de producción para *Quercus robur* en Galicia, correspondientes a índices de sitio de 10, 15 y 20 m a la edad de referencia de 60 años. Clase de densidad alta.

IS = 10 m																
Variables entrada		Masa principal antes de clara					Masa extraída				Masa principal después de clara				Masa total	
<i>t</i>	<i>H₀</i>	<i>N</i>	<i>d_g</i>	<i>G</i>	<i>V</i>	<i>N_e</i>	<i>G_e</i>	<i>V_e</i>	<i>V_{eac}</i>	<i>N_p</i>	<i>d_{gp}</i>	<i>G_p</i>	<i>V_p</i>	<i>V_t</i>	<i>C_m</i>	<i>C_c</i>
60	10,0	2976	9,9	23,0	118,0	619	1,8	10,0	10,0	2356	10,7	21,3	108,0	118,0	2,0	--
70	11,2	2356	11,5	24,6	137,2	415	1,6	9,8	19,8	1942	12,3	23,0	127,5	147,3	2,1	2,9
80	12,4	1942	13,0	25,9	155,5	294	1,4	9,4	29,2	1647	13,8	24,5	146,1	175,3	2,2	2,8
90	13,4	1647	14,5	27,2	172,9	218	1,3	9,1	38,3	1429	15,2	25,9	163,8	202,2	2,2	2,7
100	14,4	1429	15,9	28,2	189,6	168	1,2	8,8	47,1	1261	16,5	27,1	180,8	227,9	2,3	2,6
110	15,3	1261	17,2	29,2	205,5	132	1,1	8,5	55,6	1129	17,8	28,2	197,0	252,6	2,3	2,5
120	16,2	1129	18,4	30,2	220,8											
IS = 15 m																
40	11,3	2314	11,7	24,7	138,8	630	2,5	15,8	15,8	1684	13,0	22,2	123,0	138,8	3,5	--
50	13,3	1684	14,3	27,0	170,5	365	2,1	15,2	31,0	1319	15,5	24,8	155,3	186,3	3,7	4,8
60	15,0	1319	16,7	28,9	199,7	235	1,9	14,4	45,4	1084	17,8	27,0	185,3	230,7	3,8	4,4
70	16,5	1084	18,9	30,5	226,7	163	1,6	13,6	59,0	921	20,0	28,9	213,1	272,1	3,9	4,1
80	17,9	921	21,0	31,9	251,9	119	1,5	12,9	71,9	802	22,0	30,5	238,9	310,9	3,9	3,9
90	19,2	802	22,9	33,2	275,4	90	1,3	12,3	84,2	711	23,9	31,8	263,1	347,4	3,9	3,6
100	20,4	711	24,8	34,3	297,6	71	1,2	11,7	95,9	641	25,6	33,1	285,9	381,8	3,8	3,4
110	21,5	641	26,5	35,3	318,4	57	1,1	11,1	107,0	584	27,3	34,2	307,3	414,3	3,8	3,3
120	22,5	584	28,1	36,2	338,2											
IS = 20 m																
30	13,0	1769	13,8	26,6	165,2	564	3,2	22,5	22,5	1205	15,7	23,4	142,7	165,2	5,5	--
40	15,7	1205	17,7	29,6	211,7	290	2,6	21,1	43,5	915	19,4	27,0	190,6	234,1	5,9	6,9
50	18,0	915	21,1	32,0	252,9	175	2,2	19,6	63,1	740	22,6	29,8	233,3	296,5	5,9	6,2
60	20,0	740	24,1	33,9	290,0	116	1,9	18,2	81,3	625	25,5	32,0	271,8	353,1	5,9	5,7
70	21,8	625	26,9	35,5	323,7	82	1,7	16,9	98,3	542	28,2	33,9	306,8	405,0	5,8	5,2
80	23,4	542	29,5	37,0	354,6	61	1,5	15,8	114,1	481	30,7	35,5	338,8	452,9	5,7	4,8
90	24,8	481	31,8	38,2	383,2	47	1,3	14,8	128,9	434	32,9	36,9	368,3	497,3	5,5	4,4
100	26,1	434	34,0	39,3	409,7	38	1,2	14,0	142,9	396	35,0	38,1	395,8	538,6	5,4	4,1
110	27,3	396	36,0	40,3	434,5	31	1,1	13,2	156,0	365	37,0	39,3	421,4	577,4	5,2	3,9
120	28,4	365	37,9	41,3	457,8											

Nota: *IS* = índice de sitio (m); *t* = edad (años); *H₀* = altura dominante (m); *N* = pies/ha; *d_g* = diámetro medio cuadrático (cm); *G* = área basimétrica (m²/ha); *V* = volumen (m³/ha); los subíndices *e* y *p* hacen referencia a las variables anteriores, pero para la masa extraída y la masa después de clara respectivamente; *V_{eac}* = volumen extraído acumulado en las claras (m³/ha); *V_t* = volumen de la masa total (m³/ha); *C_m* = crecimiento medio anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹); *C_c* = crecimiento corriente anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹).

Tabla 3.8. Tablas de producción para *Quercus robur* en Galicia, correspondientes a índices de sitio de 10, 15 y 20 m a la edad de referencia de 60 años. Clase de densidad baja.

IS = 10 m																
Variables entrada		Masa principal antes de clara					Masa extraída				Masa principal después de clara				Masa total	
<i>t</i>	<i>H</i> ₀	<i>N</i>	<i>d</i> _g	<i>G</i>	<i>V</i>	<i>N</i> _e	<i>G</i> _e	<i>V</i> _e	<i>V</i> _{eac}	<i>N</i> _p	<i>d</i> _{gp}	<i>G</i> _p	<i>V</i> _p	<i>V</i> _t	<i>C</i> _m	<i>C</i> _c
40	7,2	2538	8,5	14,5	55,9	723	1,6	6,7	6,7	1814	9,5	12,9	49,2	55,9	1,4	--
50	8,7	1814	10,7	16,3	72,5	412	1,4	6,8	13,5	1402	11,6	14,9	65,7	79,2	1,6	2,3
60	10,0	1402	12,7	17,9	88,6	262	1,2	6,7	20,2	1140	13,6	16,6	81,9	102,1	1,7	2,3
70	11,2	1140	14,7	19,2	104,0	180	1,1	6,6	26,8	960	15,5	18,1	97,5	124,3	1,8	2,2
80	12,4	960	16,5	20,4	118,9	130	1,0	6,4	33,2	829	17,3	19,4	112,5	145,7	1,8	2,1
90	13,4	829	18,2	21,5	133,1	98	0,9	6,3	39,5	731	19,0	20,6	126,9	166,4	1,8	2,1
100	14,4	731	19,8	22,5	146,9	77	0,8	6,1	45,6	654	20,5	21,7	140,8	186,3	1,9	2,0
110	15,3	654	21,3	23,4	160,0	61	0,8	5,9	51,4	593	22,1	22,6	154,1	205,6	1,9	1,9
120	16,2	593	22,8	24,2	172,7											
IS = 15 m																
30	9,1	1662	11,3	16,8	77,6	540	2,1	10,8	10,8	1121	12,9	14,7	66,8	77,6	2,6	--
40	11,3	1121	14,8	19,3	105,3	276	1,8	10,7	21,5	846	16,3	17,6	94,6	116,1	2,9	3,9
50	13,3	846	17,9	21,4	131,2	165	1,5	10,4	31,9	681	19,3	19,9	120,7	152,7	3,1	3,7
60	15,0	681	20,8	23,1	155,2	109	1,3	10,0	41,9	572	22,0	21,8	145,2	187,1	3,1	3,4
70	16,5	572	23,4	24,6	177,7	77	1,2	9,5	51,4	495	24,5	23,4	168,2	219,6	3,1	3,2
80	17,9	495	25,8	25,9	198,8	57	1,1	9,1	60,5	438	26,9	24,8	189,7	250,2	3,1	3,1
90	19,2	438	28,0	27,0	218,7	44	1,0	8,7	69,2	393	29,0	26,1	210,0	279,2	3,1	2,9
100	20,4	393	30,1	28,1	237,5	35	0,9	8,3	77,5	358	31,1	27,2	229,2	306,7	3,1	2,7
110	21,5	358	32,1	29,0	255,3	28	0,8	7,9	85,4	330	33,0	28,2	247,4	332,8	3,0	2,6
120	22,5	330	33,9	29,9	272,2											
IS = 20 m																
30	13,0	883	17,4	21,0	126,8	255	2,3	15,4	15,4	628	19,5	18,8	111,4	126,8	4,2	--
40	15,7	628	21,9	23,8	165,2	136	1,9	14,7	30,1	492	23,8	21,9	150,5	180,6	4,5	5,4
50	18,0	492	25,9	25,9	199,7	84	1,6	13,8	43,9	408	27,6	24,3	185,9	229,8	4,6	4,9
60	20,0	408	29,4	27,7	231,0	57	1,4	12,9	56,8	351	30,9	26,3	218,1	275,0	4,6	4,5
70	21,8	351	32,6	29,2	259,8	41	1,2	12,1	68,9	309	34,0	28,0	247,7	316,6	4,5	4,2
80	23,4	309	35,5	30,6	286,3	31	1,1	11,4	80,3	278	36,7	29,5	274,9	355,2	4,4	3,9
90	24,8	278	38,1	31,7	310,9	24	1,0	10,7	91,0	254	39,3	30,8	300,2	391,2	4,3	3,6
100	26,1	254	40,6	32,8	333,9	20	0,9	10,1	101,1	234	41,7	31,9	323,8	425,0	4,2	3,4
110	27,3	234	42,9	33,8	355,5	16	0,8	9,6	110,7	218	43,9	32,9	346,0	456,7	4,2	3,2
120	28,4	218	45,0	34,6	375,9											

Nota: *IS* = índice de sitio (m); *t* = edad (años); *H*₀ = altura dominante (m); *N* = pies/ha; *d*_g = diámetro medio cuadrático (cm); *G* = área basimétrica (m²/ha); *V* = volumen (m³/ha); los subíndices *e* y *p* hacen referencia a las variables anteriores, pero para la masa extraída y la masa después de clara respectivamente; *V*_{eac} = volumen extraído acumulado en las claras (m³/ha); *V*_t = volumen de la masa total (m³/ha); *C*_m = crecimiento medio anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹); *C*_c = crecimiento corriente anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹).

3.2.8. Ejemplo de utilización de las tablas de producción

Como ya se ha indicado, una tabla de producción sólo es aplicable a rodales regulares y monoespecíficos de la especie considerada, que se encuentren dentro del ámbito geográfico para el que se haya construido la tabla, que estén incluidos dentro del rango de calidades de estación existentes, y que se hayan gestionado siguiendo alguno de los regímenes selvícolas establecidos en la tabla.

Mediante las ecuaciones correspondientes a las relaciones fundamentales es posible construir, con una hoja de cálculo informática, una tabla de producción específica para un determinado rodal del que se conozcan las dos variables de entrada de este tipo de modelos: su edad y su altura dominante. En el CD-ROM adjunto a este libro se incluye un archivo de Microsoft® Office Excel 2003, denominado 03_TP.xls ("Tablas de Producción"), que permite generar tablas de producción de *Betula alba*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur* específicas para un rodal, a partir de los valores de las variables de entrada indicadas.

Suponiendo que no fuera posible para un usuario generar esa tabla específica para un rodal conocido, existen dos alternativas para obtener valores aproximados: la primera consiste en escoger la tabla de producción que corresponda a la calidad de estación más parecida a la del rodal y, en el caso de que la edad buscada no figure en la tabla seleccionada, realizar interpolaciones lineales entre las edades existentes; la segunda alternativa, más precisa que la anterior pero más compleja, se basa en emplear las dos tablas de producción que correspondan a las calidades de estación superior e inferior a la del rodal e interpolar linealmente entre ellas en función de los valores de la altura dominante para la edad considerada. Lógicamente, si la edad del rodal no aparece en las tablas hay que interpolar previamente entre edades para cada calidad, como se ha indicado anteriormente.

En el libro de Madrigal et al. (1999) se presenta un ejemplo de interpolación entre tablas de producción para el caso más general y complejo que se podría plantear: un rodal con un área basimétrica, una calidad de estación y una edad que no coincidiesen con las indicadas en las tablas, pero cuyos valores se encontrasen dentro de sus márgenes. Es importante destacar que este tipo de interpolaciones, debido a las simplificaciones que conllevan, son una fuente de error y su uso sólo se justifica como método rápido para obtener una primera aproximación del valor buscado.

Conviene recordar que las tablas de producción representan rodales con pies que cubren completamente la superficie, situación que no siempre se cumple y que obliga a realizar una corrección en las estimaciones de volúmenes y crecimientos cuando se pretende aplicar las tablas de producción a un rodal concreto. Esa corrección se debe a la diferencia entre el área basimétrica medida en el rodal y la que figura en la tabla para esa misma edad, calidad de estación y selvicultura (siempre hay que suponer que la selvicultura aplicada al rodal es, al menos, similar a la que propugna la tabla de producción).

A continuación se muestra con un ejemplo cómo emplear esa corrección, para lo que se supone que se pretende estimar el volumen total, el crecimiento corriente y el turno de máxima renta en especie para un rodal gallego de *Betula alba*, en el que se han determinado un área basimétrica de 16,7 m²/ha, una edad media de 32 años y una altura dominante de 18,0 m. Finalmente, se indican los criterios a tener en cuenta para establecer un régimen de claras.

Determinación de la calidad de estación

Como paso previo para la estimación del volumen y del crecimiento corriente de dicho rodal es necesario determinar la clase de calidad a la que pertenece. Aunque, como ya se ha dicho, el procedimiento ideal sería desarrollar la tabla específica para este rodal, puesto que lo único que se pretende en este ejemplo es ilustrar como se realiza la corrección por área basimétrica, se va a utilizar la tabla de producción de la calidad más similar a la del rodal. Para ello, con los valores de edad t (32 años) y altura dominante H_0 (18,0 m) del rodal se entra en las curvas de calidad de la figura 3.5, resultando que el rodal posee una calidad que se encuentra en el intervalo comprendido entre las curvas medias de las clases de calidad 11 y 15, aunque más cercano a la calidad 15, por lo que será la tabla de producción de esta calidad la que se emplee.

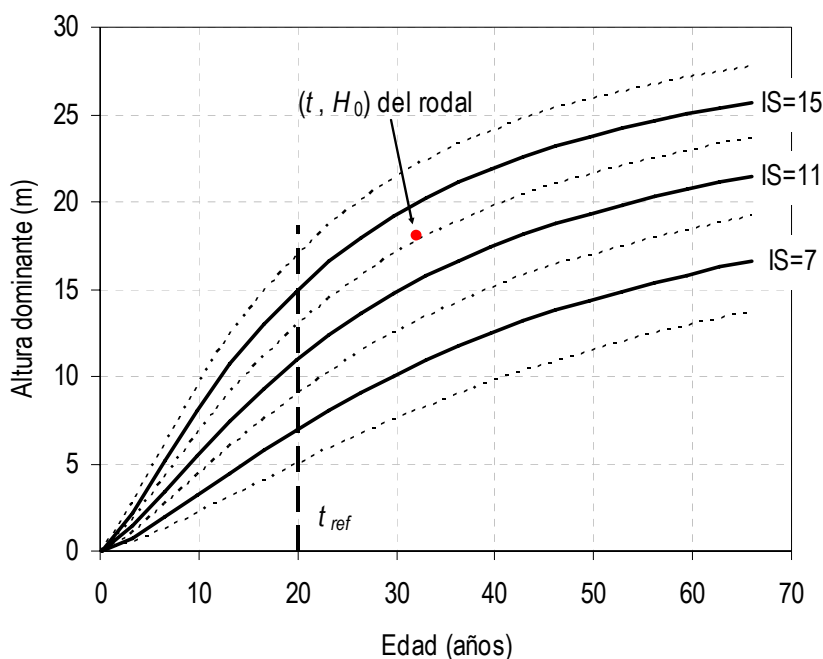


Figura 3.5. Determinación de la clase de calidad de estación del rodal objeto de estudio mediante la utilización de las curvas de calidad de estación de *Betula alba* en Galicia.

Estimación del volumen y el crecimiento

Ya se ha dicho que las tablas de producción representan rodales con árboles que ocupan por completo toda su superficie, sin huecos ni rasos, y que los rodales a los que generalmente se

aplican suelen presentar densidades menores. Por esta razón, los datos de las tablas de producción no son directamente aplicables a cualquier rodal, aunque es posible obtener estimaciones de sus volúmenes y de sus crecimientos si se conoce su área basimétrica G_{rodal} .

Así, una vez conocidas la edad y la clase de calidad de estación del rodal en cuestión y, por tanto, la tabla que debe utilizarse, se puede estimar directamente su volumen y crecimiento multiplicando los valores de dichas variables que aparecen en la correspondiente tabla de producción por el siguiente factor corrector de áreas basimétricas f (también denominado “grado de densidad”):

$$f = G_{rodal} / G_{tabla} \quad [3.3]$$

El valor del área basimétrica de la tabla de producción G_{tabla} que se debe utilizar para calcular el “grado de densidad” es el que corresponde al estado en que se encuentre el rodal (habitualmente en situación de masa principal antes de clara).

Volviendo al ejemplo, se debería tomar como referencia la tabla de producción correspondiente a la calidad de estación cuyo índice de sitio es 15 m para estimar el volumen y el crecimiento del rodal (ver tabla 3.3), ya que se ha determinado que ésa es la clase de calidad más similar. En la tabla 3.9 se muestra un resumen de las variables de interés de dicha tabla de producción para las dos edades entre las que se encuentra la edad del rodal (32 años).

Tabla 3.9. Extracto de las tablas de producción de *Betula alba* en Galicia para el índice de sitio 15 (tabla 3.3). Se muestran solamente las variables de entrada, de la masa principal antes de clara y de la masa total.

Variables entrada		Masa principal antes de clara			Masa total		
IS = 15 m							
<i>t</i>	<i>H</i> ₀	<i>N</i>	<i>G</i>	<i>V</i>	<i>V</i> _{<i>t</i>}	<i>C</i> _{<i>m</i>}	<i>C</i> _{<i>c</i>}
30	19,3	690	23,7	173,7	214,4	7,1	7,3
35	20,8	611	25,0	196,4	245,5	7,0	6,2

Nota: *IS* = índice de sitio (m); *t* = edad (años); *H₀* = altura dominante (m); *N* = pies/ha; *G* = área basimétrica (m²/ha); *V* = volumen (m³/ha); *V_t* = volumen de la masa total (m³/ha); *C_m* = crecimiento medio anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹); *C_c* = crecimiento corriente anual (m³ ha⁻¹ año⁻¹).

A partir de estos valores, y mediante interpolación lineal, se puede determinar el volumen de masa total V_t a la edad de 32 años:

$$V_{t32} = 214,4 + 2 \cdot (245,5 - 214,4) / (35 - 30) = 226,8 \text{ m}^3/\text{ha} \quad [3.4]$$

y de forma similar para las otras dos variables:

$$C_{c32} = 7,3 + 2 \cdot (6,2 - 7,3) / (35 - 30) = 6,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \quad [3.5]$$

$$G_{32} = 23,7 + 2 \cdot (25,0 - 23,7) / (35 - 30) = 24,2 \text{ m}^2/\text{ha} \quad [3.6]$$

Estos valores son, en definitiva, los que debería tener a la edad de 32 años un rodal ideal de una calidad y edad idénticas a las de la tabla de producción. Por tanto, son los que se van a utilizar como referencia para la estimación del volumen total y del crecimiento corriente del rodal en estudio.

Se calcula ahora el factor corrector de áreas basimétricas como:

$$f = G_{\text{rodal}} / G_{32} = 16,7 / 24,2 = 0,690 \quad [3.7]$$

Entonces, una estimación del volumen total del rodal se obtiene como el producto del valor que corresponde a la tabla para los 32 años por dicho factor de corrección, es decir:

$$V_{\text{rodal}} = V_{t32} \cdot f = 226,8 \cdot 0,690 = 156,5 \text{ m}^3/\text{ha} \quad [3.8]$$

El crecimiento corriente se obtiene de forma similar como:

$$C_{\text{rodal}} = C_{c32} \cdot f = 6,9 \cdot 0,690 = 4,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \quad [3.9]$$

En cualquier caso, es necesario recordar que los volúmenes y crecimientos así calculados representan únicamente una referencia válida para realizar comparaciones entre rodales o valoraciones, pero que casi nunca pueden sustituir a un inventario en cuanto a precisión (Madrigal et al., 1999).

Determinación de turnos

El turno de máxima renta en especie de un rodal forestal es aquel que busca la consecución de la mayor cantidad posible de un determinado producto, en este caso de madera, durante infinitos ciclos productivos. Dicho turno se corresponde con la edad a la que se igualan los crecimientos anuales medio y corriente en volumen de la masa total, que coincide con la edad a la que se obtiene el valor máximo del crecimiento medio anual.

A partir de una tabla de producción resulta muy sencillo determinar ese turno, pues basta con buscar en la columna del crecimiento medio en volumen de la masa total su máximo valor y posteriormente calcular, por interpolación, la edad a la cual el crecimiento corriente en volumen de la masa total alcanza ese mismo valor. De cualquier manera, siempre debería compararse el turno de máxima renta en especie elegido con los que se obtuviesen al aplicar otros criterios (tecnológicos, financieros, etc.).

Para la determinación del turno de máxima renta en especie en el rodal de *Betula alba* del ejemplo se comparan las columnas de crecimiento medio y crecimiento corriente de la tabla de producción correspondiente a la calidad de estación cuyo índice de sitio es 15 m a los 20 años (ver tabla 3.3). En dicha tabla se observa que el valor máximo del crecimiento medio es de $7,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, correspondiendo a un intervalo de edades que va de los 25 a los 30 años, y a los 35 años se reduce a $7,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Por su parte, el crecimiento corriente es superior al crecimiento medio a los 30 años ($7,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) e inferior a los 35 años ($6,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), por

lo que el turno de máxima renta en especie T_{mre} se alcanza entre estas dos edades (exactamente a la edad a la que el crecimiento corriente es igual a $7,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), y su valor se puede calcular de forma precisa mediante la siguiente interpolación lineal:

$$T_{mre} = 35 - (35 - 30) \cdot (6,2 - 7,1) / (6,2 - 7,3) = 30,9 \text{ años} \approx 31 \text{ años} \quad [3.10]$$

El turno de máxima renta en especie, aunque matemáticamente corresponde y se determina como una edad fija o exacta, puede asimilarse a un intervalo de edades más o menos amplio, en el cual los valores del crecimiento medio máximo varían muy poco. Así, en este ejemplo, si se considerase válida una variación de $0,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el valor máximo del crecimiento medio, la banda de edades en la que se cumpliría el criterio de máxima renta especie se ampliaría al intervalo que va de los 25 a los 35 años (incluyendo el valor de $7,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Esto permite cierto margen de maniobra para aplicar este tipo de turnos y, por lo tanto, es posible tener en cuenta otras consideraciones para fijar la rotación óptima de un rodal manteniéndose dentro de esa banda de edades en la que se cumple la máxima renta en especie (o el crecimiento medio máximo).

Por ejemplo, en montes que se pretendan ordenar por el método de división por cabida en base al turno de máxima renta en especie, éste debe ser el producto del número de tronzones por su periodicidad de corta (que dependen de la superficie disponible, de su productividad y de las restricciones existentes por pendiente, paisaje, etc.), lo que puede obligar a incrementar o a disminuir ligeramente el turno calculado anteriormente, pero siempre dentro del intervalo de máxima renta en especie. En el caso práctico que se está siguiendo, si se fijara como turno de máxima renta el obtenido mediante interpolación lineal (31 años), habría poco margen de maniobra para ordenar un monte, pues esa cifra es un número primo que sólo puede dividirse por sí mismo o por la unidad para obtener un número entero y, por lo tanto, sólo sería aplicable ese turno si se estableciese un único tronzón con una periodicidad de corta de 31 años, o 31 tronzones con una periodicidad de corta anual. Resulta evidente que cada caso real tiene sus propios condicionantes, y en función de ellos podría modificarse el turno del rodal del ejemplo hasta, por ejemplo, 30 años (divisible también, dando lugar a un valor entero, por 2, 3, 5, 6, 10 y 15 años) o 35 años (divisible por 5 y 7), cifras que permiten un mayor número de opciones para organizar un monte ordenado, y que se pueden considerar dentro del intervalo de la máxima renta en especie.

Las tablas de producción también se pueden utilizar para calcular otros tipos de turnos además de los de máxima renta en especie. Así, es posible determinar turnos tecnológicos (edad a la que se alcanza un determinado diámetro medio cuadrático, un volumen medio del árbol aprovechado, etc.), turnos financieros (comparación de ingresos y gastos a lo largo del ciclo productivo, calculados a partir de los datos de volúmenes y dimensiones medias de los productos extraídos en cada edad, que se obtienen de las tablas, y de su precio esperado), etc.

Planteamiento de distintos regímenes de clara

Las tablas de producción responden a una determinada alternativa selvícola, que se materializa en la evolución de la densidad de la masa principal antes de clara que se propone, y que se puede

utilizar como modelo de referencia para la elección del régimen de claras que se podría aplicar a un rodal de la especie considerada.

Así, podrían utilizarse las tablas de producción de *Betula alba* en Galicia como referencia para plantear el tratamiento selvícola a seguir en el rodal del ejemplo, pero sería necesario tener en cuenta las siguientes cuestiones a la hora de tomar decisiones acerca de las claras a realizar (Madrigal et al., 1999):

- ✓ La rotación de claras que parece aconsejarse en las tablas (5 años) es ficticia, y se debe al propio proceso de construcción y a la manera de presentar los datos. Esto quiere decir que las tablas no proponen hacer una clara cada 5 años durante todo el ciclo productivo de la especie, sino que se presentan los datos de las condiciones del rodal en intervalos de 5 años, que pueden utilizarse para estimar los resultados que se obtendrían a cualquier edad. Por otro lado, también resulta evidente que entre la última clara y la corta final deberían transcurrir más años de los que marca la rotación de la tabla.
- ✓ Los valores del número de pies por hectárea que aparecen en las tablas, que también dependen de la propia metodología de construcción, no se deben considerar como cifras exactas sino orientativas. Por ejemplo, resulta ilógico, y casi imposible, tratar de conseguir una densidad de exactamente 611 pies/ha.
- ✓ Nunca se debe tratar de ajustar de forma “brusca” (en una sola clara) la densidad real de un rodal, sobre todo si es adulto, a lo que se indique en unas tablas de producción si no se ha seguido el régimen de claras adecuado desde las primeras edades. Como recomendación general, no se deben realizar nunca claras que extraigan de una sola vez más del 45-50% de los pies para tratar de adecuar la densidad a la propuesta en unas tablas, ya que se estaría poniendo en peligro la estabilidad del rodal frente a vientos o temporales y, además, se estaría perdiendo producción.

3.3. Diagramas de manejo de la densidad

3.3.1. Definición, concepto y utilidades

La densidad es una de las pocas características de un rodal forestal que se puede controlar de manera eficiente y rentable (Zeide, 2004), pudiéndose utilizar, entonces, para establecer unas reglas selvícolas sencillas de aplicar. Conceptualmente, la gestión de la densidad es el proceso de control del espacio disponible para el crecimiento de los árboles por medio de dos herramientas: la densidad inicial de establecimiento y las claras posteriores (Long, 1985; Newton, 1997, 2003).

La determinación de los niveles adecuados de densidad para una masa forestal en una situación determinada es un proceso complejo que depende de factores biológicos, tecnológicos, económicos y operacionales. Desde el punto de vista productivo, entre las diferentes alternativas selvícolas que pueden plantearse para un rodal forestal concreto se considera óptima aquella que

permite un máximo aprovechamiento de los recursos de la estación en la que se asienta. Este máximo aprovechamiento puede conseguirse con un amplio rango de densidades, que varía entre un límite superior y otro inferior. El límite superior se corresponde con aquel nivel de densidad a partir del cual se produce mortalidad natural por competencia. Por su parte, el límite inferior se establece cuando todos los recursos de la estación son utilizados por los árboles del rodal de modo que cada uno de ellos asimila todo lo que su condición genética y edad le permite; es decir, cuando los individuos desarrollan su máxima capacidad de crecimiento. Por debajo de esa densidad límite inferior se pierde capacidad productiva.

La adecuación de estos límites de densidad a un objetivo selvícola concreto es uno de los pasos más difíciles en la gestión de un rodal (Davis, 1966), y una de las formas más adecuadas para conseguirlo es la utilización de los llamados diagramas de manejo de la densidad (DMD).

Los DMD son modelos estáticos de rodal en los que se representa gráficamente la relación entre producción y densidad para los distintos estados de desarrollo del rodal. Su utilidad básica radica en que permiten realizar de una forma rápida y sencilla la comparación entre diferentes alternativas selvícolas de claras considerando diferentes propósitos (producción de madera de unas determinadas dimensiones, minimizar el tiempo requerido para un objetivo específico, etc.). Por tanto, el uso de los DMD es uno de los métodos más efectivos para el diseño, representación y evaluación de regímenes de claras en rodales regulares.

Como ya se ha comentado, los DMD, al igual que las tablas de producción, son modelos estáticos de rodal, pero se diferencian de éstas en tres aspectos fundamentales: presentan en forma gráfica toda la información, no precisan de la utilización de las curvas de calidad de estación, y no fijan una evolución de antemano del número de pies por unidad de superficie.

La estructura básica de un DMD está compuesta por dos ecuaciones y un índice de caracterización de la densidad. La caracterización del nivel de densidad del rodal se realiza mediante índices que relacionan el tamaño de un árbol medio “representativo” (p. ej., árbol de altura, diámetro o volumen medio) con la densidad expresada en número de pies por hectárea. Entre estos índices se encuentran el índice de Reineke (1933), la regla de autoaclareo de Yoda et al. (1963), el índice de densidad relativo (Drew y Flewelling, 1979) o el índice de espaciamiento relativo (Wilson, 1946). La principal ventaja de todos estos índices es que son independientes de la calidad de estación y de la edad (Long, 1985).

En este apartado se va a explicar la construcción y utilización de los DMD basados en el índice de Hart-Becking (ver apartado 3.3.3), por su fácil interpretación y amplio uso en España para la determinación de la necesidad y el peso de las claras. El índice de Hart-Becking también es útil para caracterizar la densidad por ser independiente de la calidad de estación y de la edad (excepto para rodales muy jóvenes), y también porque la altura dominante (incluida en su formulación) es el mejor índice para establecer los intervalos de clara para una determinada especie desde un punto de vista biológico. La relación existente entre el crecimiento en altura dominante y la productividad forestal añade una utilidad extra a estos diagramas para propósitos de gestión.

Según Barrio-Anta (2003), algunas de las características y utilidades de los DMD son las siguientes:

- ✓ Son sencillos de aplicar en la práctica y requieren variables de entrada que se pueden obtener fácilmente a partir de inventarios forestales convencionales.
- ✓ Permiten simular distintas alternativas de gestión, con lo que se convierten en una herramienta complementaria de las tablas de producción de selvicultura media observada, más rígidas en su esquema de evolución de la densidad. Así, es posible fijar una meta productiva y seleccionar las combinaciones de espaciamiento inicial del rodal y las claras necesarias para alcanzar ese objetivo (Cameron, 1988; Chauchard, 2001).
- ✓ Permiten la elaboración rápida de esquemas de claras para diferentes objetivos de gestión (Dean y Baldwin, 1993).
- ✓ Son independientes de la edad, variable a veces difícil de conocer en rodales naturales. No obstante, se puede determinar la edad asociada a cada tratamiento de clara conociendo el índice de sitio del rodal y utilizando unas curvas de calidad de estación. Conocida la edad asociada a cada tratamiento se puede elaborar una tabla numérica con un formato similar al de las tablas de producción para cada esquema selvícola, con las mismas variables y aplicaciones que las explicadas en el apartado correspondiente.
- ✓ Permiten sobrescribir fácilmente información adicional sobre el diagrama, siempre que dicha información pueda expresarse, en último término, en función de las dos variables que figuran en los ejes de coordenadas del diagrama (que habitualmente son el número de árboles por hectárea en el eje de ordenadas y la altura dominante en el eje de abscisas).

En este capítulo se presentan unos DMD para los rodales regulares de *Betula alba* y *Quercus robur* de Galicia, así como para los rodales de *Pseudotsuga menziesii* en España, obtenidos a partir de las mediciones realizadas en las redes de parcelas de crecimiento instaladas en sus masas. Los diagramas de *Betula alba* y *Pseudotsuga menziesii* son los primeros trabajos de este tipo que se han realizado para estas especies, mientras que el de *Quercus robur* corresponde a una actualización de los elaborados previamente por Barrio-Anta (2003) y por Barrio-Anta y Álvarez-González (2005).

3.3.2. Datos

Los datos que se han empleado para la construcción de los DMD son los mismos que se han utilizado para la construcción de las tablas de producción, por lo que sus estadísticos descriptivos se pueden consultar en la tabla 3.1.



Figura 3.6. Rodal de *Quercus robur* en Avión (Ourense).

3.3.3. Metodología de construcción de los diagramas de manejo de la densidad

Funciones utilizadas y metodología de ajuste

Los DMD que se presentan se construyen a partir de dos funciones y del empleo del índice de Hart-Becking. Este índice, propuesto para plantaciones por Hart (1928) y posteriormente denominado índice de espaciamiento por Becking (1954) e índice de espaciamiento relativo por Beekhuis (1966), se define como la razón, expresada en porcentaje, entre la distancia media de los árboles del rodal y su altura dominante. La distancia media entre árboles depende de la distribución teórica de éstos en el terreno que se asuma, de modo que la expresión del índice de Hart-Becking es:

$$IH (\%) = k \cdot \frac{100}{\sqrt{N} \cdot H_0} \cdot 100 \quad [3.11]$$

donde la constante k es igual a 1 si se asume una distribución de los árboles en marco real o malla cuadrada (típica de plantaciones), o igual a $(4/3)^{0,25}$ si se asume una distribución al tresbolillo o triangular (aplicada habitualmente a rodales naturales). Resulta indiferente utilizar cualquiera de estas dos distribuciones teóricas, ya que existe una relación de proporcionalidad

entre los valores del índice de Hart-Becking para ambas. Sin embargo, es fundamental indicar en cada caso qué distribución se ha asumido, para que los valores de este índice se puedan interpretar correctamente.

El hecho de escoger este índice y no otro determina las variables que aparecen en los ejes de coordenadas del DMD, puesto que deben ser las mismas variables que se emplean para calcular el valor del índice, que en este caso son el número de árboles por hectárea y la altura dominante. A su vez, la expresión matemática de las dos funciones a ajustar está condicionada por la necesidad de que en ellas figuren estas dos variables y, además, por el hecho de que las relaciones entre variables tengan sentido biológico.

La primera de las funciones permite predecir el diámetro medio cuadrático d_g a partir del número de pies por hectárea N y de la altura dominante H_0 del rodal, y coincide con la tercera relación fundamental empleada en la construcción de las tablas de producción descritas en el apartado 3.2.4:

$$d_g = b_0 \cdot N^{b_1} \cdot H_0^{b_2} \quad [3.12]$$

La segunda de las funciones debe permitir estimar la productividad del rodal, expresada como el volumen o la biomasa por unidad de superficie. En el caso de que la variable elegida para incluir en el diagrama sea el volumen, la segunda de las funciones coincide con la cuarta relación fundamental de las tablas de producción descritas en el apartado 3.2.4:

$$V = b_3 \cdot d_g^{b_4} \cdot H_0^{b_5} \cdot N^{b_6} \quad [3.13]$$

Por tanto, las mismas funciones que se han empleado en la construcción de las tablas de producción de *Betula alba*, *Pseudotsuga menziessi* y *Quercus robur* que se presentan en este libro, se han utilizado para elaborar los DMD de dichas especies.

Representación gráfica del DMD

A partir de las tres ecuaciones anteriores, despejando en cada una de ellas el número de pies por hectárea N y fijando distintos valores para el índice de Hart-Becking IH , el diámetro medio cuadrático d_g y el volumen del rodal V (dentro del rango de datos utilizados en la construcción del diagrama), se obtienen las expresiones que permiten representar las isolíneas de dichas variables. Estas isolíneas se superponen en un diagrama cartesiano con la altura dominante en abscisas y el número de pies por hectárea en ordenadas, con lo cual queda definido el DMD (figura 3.7).

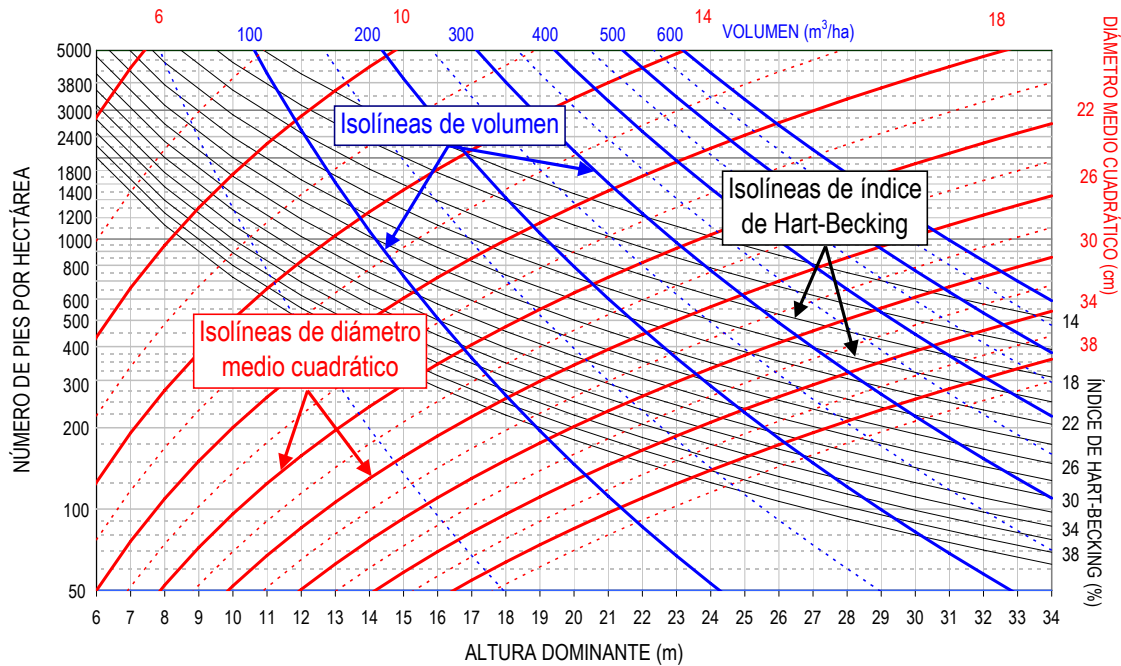


Figura 3.7. Aspecto de un DMD en el que se aprecian las distintas líneas de valores constantes (o isótopas) de volumen del rodal, diámetro medio cuadrático e índice de Hart-Becking. En el eje de ordenadas se representa el número de pies por hectárea (en escala logarítmica) y en el eje de abscisas la altura dominante según el criterio derivado de Assmann (altura media de los 100 pies más gruesos por hectárea; ver apartado 2.1.6 y anexo I).

Los pasos seguidos para elaborar los DMD para *Betula alba*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur* han sido, entonces, los siguientes:

1. Representar la altura dominante H_0 en el eje X y el número de pies por hectárea N en el eje Y, este último en escala logarítmica para facilitar el uso del diagrama.
2. Expresar el nivel de densidad del rodal mediante el índice de Hart-Becking IH . Las isótopas para este índice se obtienen despejando N y dando valores a la altura dominante para cada valor del índice que se quiera representar:

$$N = \left(k \cdot \frac{100 \cdot 100}{IH \cdot H_0} \right)^2 \quad [3.14]$$

Para *Betula alba* y *Quercus robur* se ha asumido una distribución al tresbolillo de los árboles sobre el terreno, por lo que el valor de la constante k es igual a $(4/3)^{0.25}$; por su parte, para *Pseudotsuga menziessi* se ha asumido una distribución en malla cuadrada, por lo que el valor de la constante k es igual a 1.

3. Representar las isótopas del diámetro medio cuadrático a partir de la ecuación [3.12]. Para ello se despeja el valor del número de árboles por hectárea N , y se van dando valores a la altura dominante para cada valor del diámetro medio cuadrático que se quiera representar:

$$N = \left(\frac{d_g}{b_0 \cdot H_0^{b_2}} \right)^{1/b_1} \quad [3.15]$$

4. Representar las isolíneas del volumen del rodal, sustituyendo la ecuación [3.12] en la [3.13], despejando el valor de N y dando valores a la altura dominante para cada valor de V que se quiera representar:

$$N = \left(\frac{V}{b_3 \cdot b_0^{b_4} \cdot H_0^{b_2 \cdot b_4 + b_5}} \right)^{\frac{1}{b_1 \cdot b_4 + b_6}} \quad [3.16]$$

3.3.4. Resultados

Diagrama de manejo de la densidad para *Betula alba* en Galicia

Como se ha indicado, las dos funciones que se han utilizado para elaborar el DMD para *Betula alba* han sido las mismas que se han ajustado para las relaciones fundamentales tercera y cuarta de las tablas de producción de la especie, que se pueden consultar en la tabla 3.2.

En la tabla 3.10 se muestran las ecuaciones finalmente utilizadas para representar las distintas isolíneas del DMD.

Tabla 3.10. Ecuaciones utilizadas para la representación de las isolíneas del índice de Hart-Becking IH (%), del diámetro medio cuadrático d_g (cm) y del volumen total V (m³/ha) que constituyen el DMD para *Betula alba* en Galicia.

Isolíneas de índice de Hart-Becking (IH)
$N = \left(\left(\frac{4}{3} \right)^{0,25} \cdot \frac{100 \cdot 100}{IH \cdot H_0} \right)^2$
Isolíneas de diámetro medio cuadrático (d_g)
$N = \left(\frac{d_g}{13,86 \cdot H_0^{0,7400}} \right)^{\frac{1}{-0,2721}}$
Isolíneas de volumen de rodal (V)
$N = \left(\frac{V}{0,01332 \cdot H_0^{2,294}} \right)^{\frac{1}{0,4112}}$

En la figura 3.8 se representa el DMD elaborado para la gestión de rodales regulares de *Betula alba* en Galicia.

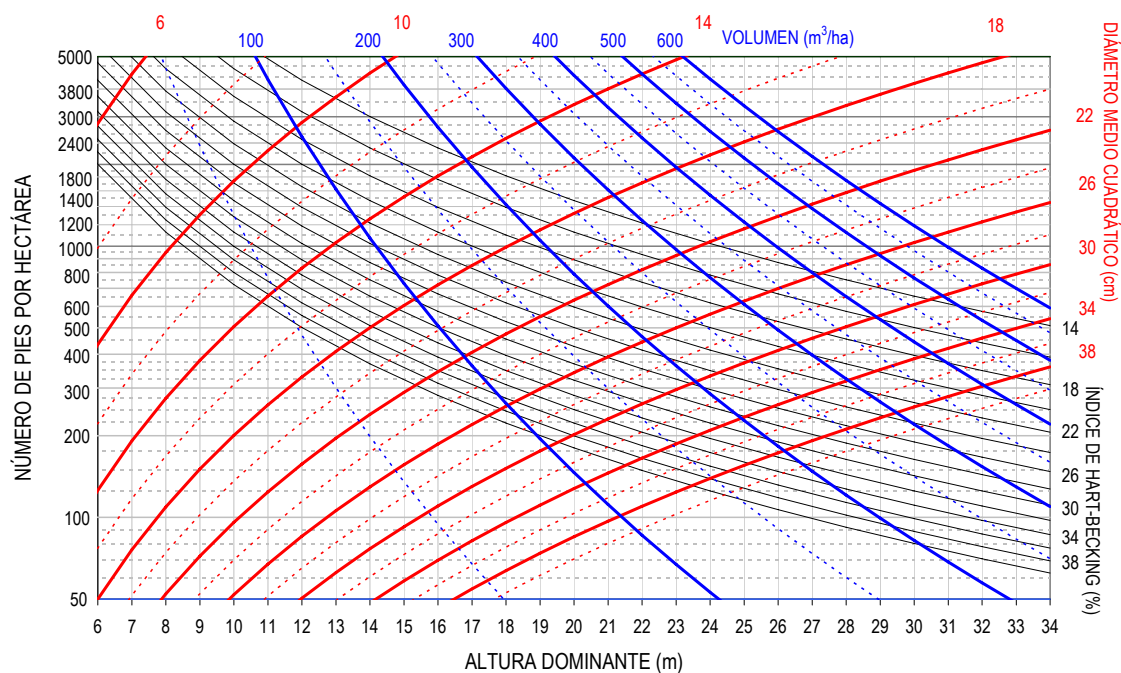


Figura 3.8. Diagrama de manejo de la densidad para *Betula alba* en Galicia.

Diagrama de manejo de la densidad para *Pseudotsuga menziesii* en España

Como ya se ha comentado, las dos funciones que se han utilizado para elaborar el DMD para *Pseudotsuga menziesii* han sido las mismas que se han ajustado para las relaciones fundamentales tercera y cuarta de las tablas de producción de la especie (López-Sánchez, 2009), cuyas expresiones se pueden consultar en la tabla 3.4.

En la tabla 3.11 se muestran las ecuaciones finalmente utilizadas para representar las distintas isolíneas del DMD.

Tabla 3.11. Ecuaciones utilizadas para la representación de las isóneas del índice de Hart-Becking IH (%), del diámetro medio cuadrático d_g (cm) y del volumen total V (m³/ha) que constituyen el DMD para *Pseudotsuga menziesii* en España.

<p>Isóneas de índice de Hart-Becking (IH)</p> $N = \left(\frac{100 \cdot 100}{IH \cdot H_0} \right)^2$
<p>Isóneas de diámetro medio cuadrático (d_g)</p> $N = \left(\frac{d_g}{22,83 \cdot H_0^{0,6720}} \right)^{\frac{1}{-0,2915}}$
<p>Isóneas de volumen de rodal (V)</p> $N = \left(\frac{V}{0,03380 \cdot H_0^{2,135}} \right)^{\frac{1}{0,4053}}$

En la figura 3.9 se representa el DMD para la gestión de rodales regulares de *Pseudotsuga menziesii* en España, elaborado por López-Sánchez (2009) en su tesis doctoral.

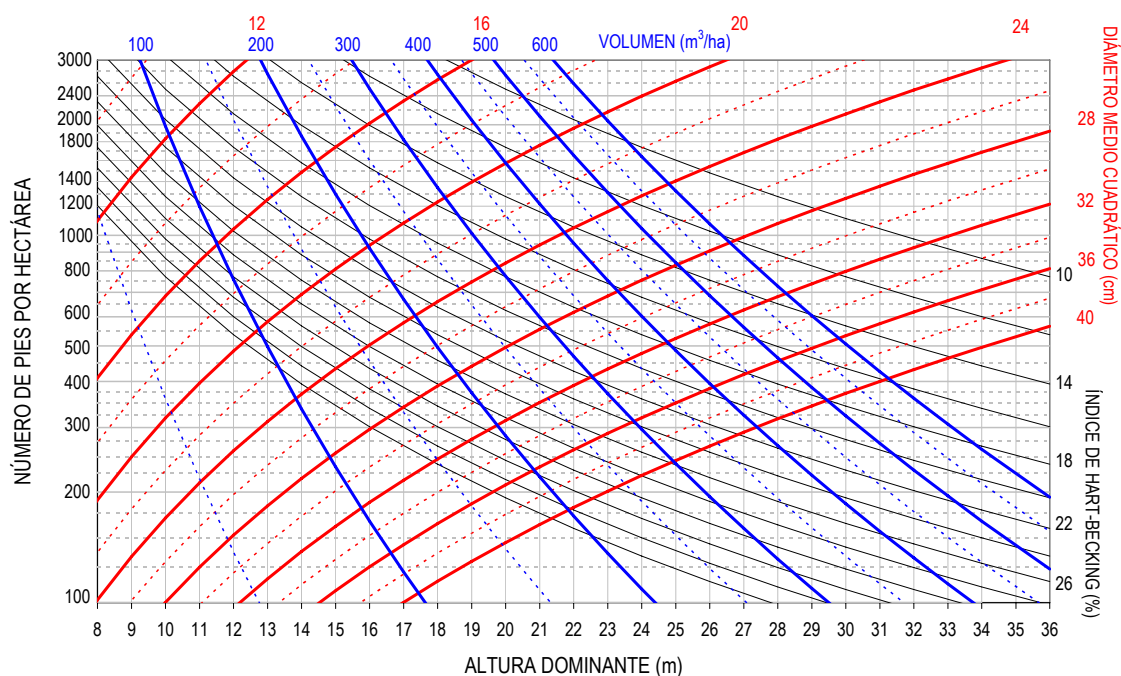


Figura 3.9. Diagrama de manejo de la densidad para *Pseudotsuga menziesii* en España.

Diagrama de manejo de la densidad para *Quercus robur* en Galicia

Como en los dos casos anteriores, las dos funciones que se han utilizado para elaborar el DMD para *Quercus robur* han sido las mismas que se han ajustado para las relaciones fundamentales tercera y cuarta de las tablas de producción de la especie, cuyas expresiones se pueden consultar en la tabla 3.6.

En la tabla 3.12 se muestran las ecuaciones finalmente utilizadas para representar las distintas isolíneas del DMD.

Tabla 3.12. Ecuaciones utilizadas para la representación de las isolíneas del índice de Hart-Becking IH (%), del diámetro medio cuadrático d_g (cm) y del volumen total V (m³/ha) que constituyen el DMD para *Quercus robur* en Galicia.

Isolíneas de índice de Hart-Becking (IH)
$N = \left(\left(\frac{4}{3} \right)^{0,25} \cdot \frac{100 \cdot 100}{IH \cdot H_0} \right)^2$
Isolíneas de diámetro medio cuadrático (d_g)
$N = \left(\frac{d_g}{33,66 \cdot H_0^{0,6185}} \right)^{\frac{1}{-0,3307}}$
Isolíneas de volumen de rodal (V)
$N = \left(\frac{V}{0,04864 \cdot H_0^{2,062}} \right)^{\frac{1}{0,3809}}$

En la figura 3.10 se representa el DMD elaborado para la gestión de rodales regulares de *Quercus robur* en Galicia.

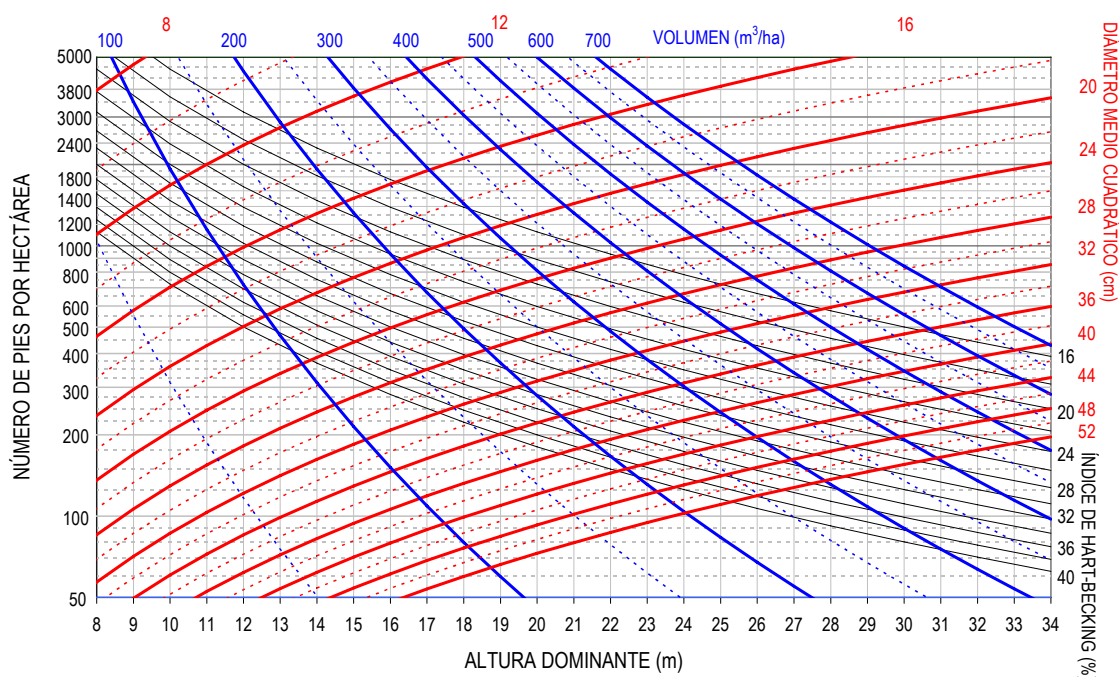


Figura 3.10. Diagrama de manejo de la densidad para *Quercus robur* en Galicia.

3.3.5. Ejemplo de uso de los diagramas de manejo de la densidad

En el CD-ROM adjunto a este libro se incluye el archivo 03b_DMD.pdf (“Diagramas de Manejo de la Densidad”), en el que se muestran los diagramas de manejo de la densidad de *Betula alba*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*.

Los DMD se pueden utilizar para estimar, de forma rápida y sencilla, el crecimiento y la producción de un rodal en un instante determinado, así como para plantear esquemas de claras, pudiéndose elaborar para cada uno de ellos una tabla numérica con formato similar al de las tablas de producción.

A continuación se muestra un ejemplo práctico de utilización de los DMD empleando el presentado en este libro para *Betula alba* en Galicia.

Estimación del crecimiento y la producción

Por medio de un DMD se puede obtener información sobre el crecimiento y la producción de un rodal en un instante determinado de manera muy sencilla, sin más que situar un punto sobre el diagrama y leer directamente en los ejes los valores de las variables que interesen.

Para ello es necesario conocer el estado del rodal en ese instante, que debe venir definido por cualquier combinación lógica de dos de las variables que se representan en el diagrama (número de pies por hectárea, altura dominante, diámetro medio cuadrático y volumen). Habitualmente es una combinación de dos de las tres primeras, ya que el volumen suele ser la variable de producción que se desea estimar.

Una vez definido el estado del rodal, que se materializa como un punto sobre el diagrama a partir de los valores de las dos variables de rodal medidas, el resto de las variables del rodal se pueden estimar siguiendo las isólinas representadas en el diagrama (o interpolando entre ellas) y leyendo en los ejes los valores a los que corresponde ese punto.

Se va seguir el ejemplo de un rodal regular de *Betula alba* en el que se ha llevado a cabo un inventario dasométrico del que se han obtenido unos valores de 215 pies/ha y un diámetro medio cuadrático d_g de 32 cm. Entrando con estos dos datos en el DMD de la especie, se obtiene el punto verde indicado en la figura 3.11. A partir del mismo se pueden leer directamente sobre el diagrama los valores de las otras variables del rodal: el volumen (150 m³/ha), la altura dominante (22 m) y el índice de Hart-Becking (33%).

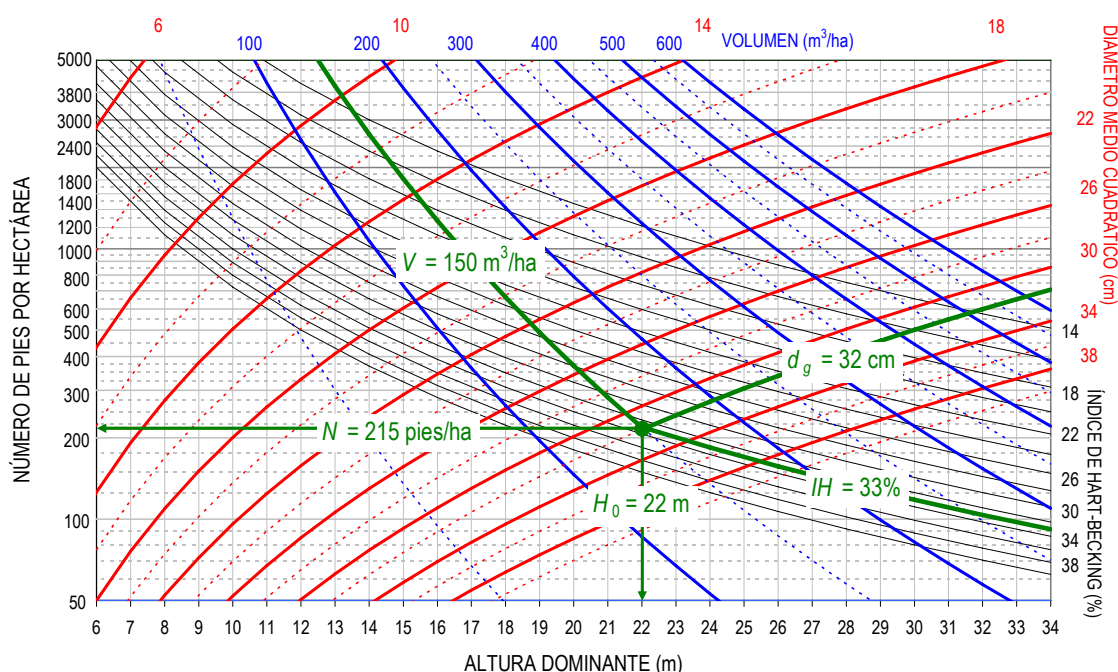


Figura 3.11. Ejemplo de estimación de variables para un rodal de *Betula alba* con 215 pies por hectárea y un diámetro medio cuadrático de 32 cm, mediante el DMD elaborado para la especie.

Planteamiento de esquemas de claras

Ya se ha comentado que una importante ventaja de los DMD es que no se basan en ninguna hipótesis de evolución del número de pies por hectárea, como ocurre con las tablas de producción, sino que es el usuario quien fija su propio esquema de evolución, proponiendo claras en los momentos que estime oportuno.

En la utilización de los DMD existen dos factores que determinan un esquema de clara: el estado al que se quiere llevar al rodal a la edad de corta y los límites superior e inferior de densidad.

La selección de los límites superior e inferior de densidad a menudo representa un compromiso entre el máximo crecimiento de la masa y el máximo crecimiento del árbol individual y

su vigor (Long, 1985). El límite superior puede fijarse como aquel valor del índice de Hart-Becking a partir del cual comienza la mortalidad natural, garantizando siempre el vigor y la estabilidad de los árboles. El límite inferior se puede establecer como un valor del índice de Hart-Becking que permita mantener una adecuada ocupación del terreno.

En la utilización práctica de los DMD se suele fijar un valor constante del índice de Hart-Becking para el límite superior de densidad y definir el intervalo de clara en términos de crecimiento en altura dominante, o bien limitar el máximo incremento en el índice de Hart-Becking tras la clara para garantizar la estabilidad posterior del rodal (Pita, 1991).

Un DMD se puede utilizar de dos maneras para establecer un régimen de claras:

- ✓ Fijar un punto objetivo en corta final y definir un esquema de claras que permita alcanzar ese objetivo.
- ✓ Partir de un rodal con unas determinadas características y plantear un esquema de claras razonable hasta la corta final.

Volviendo al ejemplo del apartado anterior, se va a considerar como punto objetivo en corta final el rodal de *Betula alba* allí definido, con 215 pies/ha y un diámetro medio cuadrático de 32 cm, con el propósito de obtener madera de buenas dimensiones destinada a aserrío.

Aunque usualmente (como en este ejemplo) los objetivos son determinados de acuerdo a la producción de madera, también podrían establecerse por cualquier otra variable no productiva que se pudiera relacionar, al menos, con el número de pies por hectárea y la altura dominante, pudiendo además incluir en su expresión cualquier otra de las variables que ya figuren en el diagrama (Dean y Baldwin, 1993).

Puesto que para que los árboles crezcan sustancialmente en diámetro se requiere un número de pies por hectárea reducido, se puede fijar como límite superior de densidad el correspondiente a un valor del índice de Hart-Becking del 30% (figura 3.12, línea negra gruesa).

Por otra parte, la frecuencia de las claras, al menos desde el punto de vista biológico, debe ser definida por el crecimiento en altura dominante (que depende de la especie y la calidad de estación) y por el espaciamiento inicial de la plantación (Pita, 1991). En este ejemplo se ha empleado el criterio de un crecimiento en altura dominante de entre 3,5 y 4,5 m para definir el momento adecuado para realizar las claras (figura 3.12).

Teniendo en cuenta estos valores, la secuencia de claras para alcanzar el punto objetivo (punto "g") se determina como una escalera ascendente hacia atrás (figura 3.12, línea de color verde). Los segmentos verticales ("ab", "cd" y "ef") representan la realización de la clara, mientras que los horizontales ("bc", "de" y "fg") reflejan el intervalo entre claras, considerando que después de la clara no existe mortalidad debida a competencia (o que se ha extraído en las claras) y, por tanto, se mantiene constante el número de pies por hectárea. Hay que tener en cuenta que siempre existe la posibilidad de ocurrencia de mortalidad debida a plagas, enfermedades o factores meteorológicos, que no va a ser predicha por el diagrama.

En la figura 3.12 también se aprecia que la situación inicial del rodal (punto “a”) justo antes de la realización de la primera clara (segmento “ab”), sería la de un rodal con unos 1.150 pies/ha, una altura dominante de 10,5 m, un diámetro medio cuadrático cercano a los 12 cm, y un volumen de algo más de 50 m³/ha. Si se quisiera obtener el valor exacto del diámetro medio cuadrático d_g y del volumen del rodal V sería necesario emplear las ecuaciones a partir de las que se ha generado el diagrama, antes de despejar el número de pies por hectárea N en su formulación (tabla 3.2). En este caso, si se introducen los valores de la altura dominante H_0 (10,5 m) y del número de pies por hectárea N (1.150) en la ecuación del diámetro medio cuadrático d_g se obtiene un valor exacto de:

$$d_g = 13,86 \cdot N^{-0,2721} \cdot H_0^{0,7400} = 13,86 \cdot 1.150^{-0,2721} \cdot 10,5^{0,7400} = 11,6 \text{ cm} \quad [3.17]$$

Igualmente, sustituyendo en la ecuación del volumen V esos dos mismos valores de H_0 y N , así como el de d_g calculado, se obtiene el siguiente resultado:

$$V = 3,898 \cdot 10^{-5} \cdot d_g^{2,219} \cdot H_0^{0,6523} \cdot N^{1,015} = 3,898 \cdot 10^{-5} \cdot 11,6^{2,219} \cdot 10,5^{0,6523} \cdot 1.150^{1,015} = 53,2 \text{ m}^3/\text{ha} \quad [3.18]$$

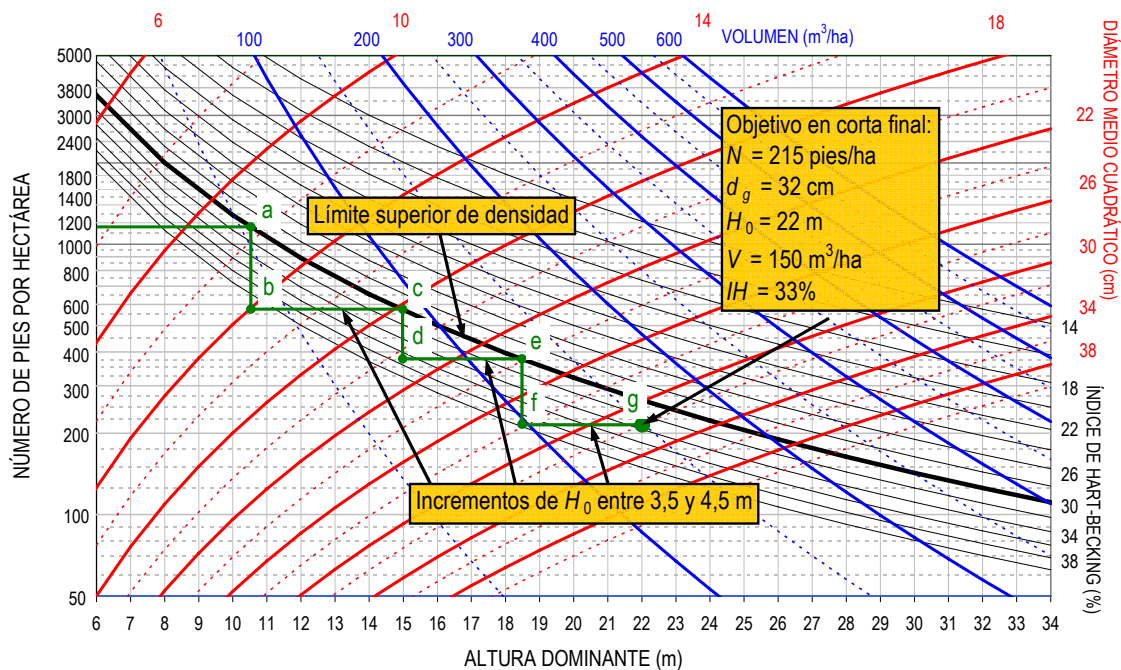


Figura 3.12. Esquema de claras (escalera en color verde) para el rodal de *Betula alba* del ejemplo, representado sobre el DMD para la especie.

Elaboración de una tabla numérica con formato de tabla de producción específica para cada esquema de clara

Una vez definido el esquema selvícola, y puesto que el DMD permite una estimación de la producción en cualquier punto, si se dispone de curvas de calidad de estación y se conoce el índice de sitio de un rodal concreto se puede generar un cuadro numérico con los valores de las principales variables de masa antes y después de clara (tabla 3.13), o bien se puede confeccionar una tabla con un formato idéntico al de las tablas de producción clásicas si el usuario así lo prefiere (tabla 3.14).

Al disponer del valor de las principales variables de masa antes y después de clara, se puede obtener fácilmente el peso de cada clara expresado como porcentaje del número de pies por hectárea, del área basimétrica o del volumen extraído.

La determinación de las edades de la corta final y de cada clara propuesta en el esquema selvícola debe llevarse a cabo empleando las curvas de calidad de estación desarrolladas por Diéguez-Aranda et al. (2006) para la especie en Galicia (ver apartado 2.3). Así, si se supone que el rodal del ejemplo tiene un índice de sitio de 15 m a los 20 años de edad de referencia, las edades asociadas a cada tratamiento en la construcción de las tablas 3.13 y 3.14 se obtienen con la curva de calidad correspondiente a dicho índice de sitio (figura 3.13).

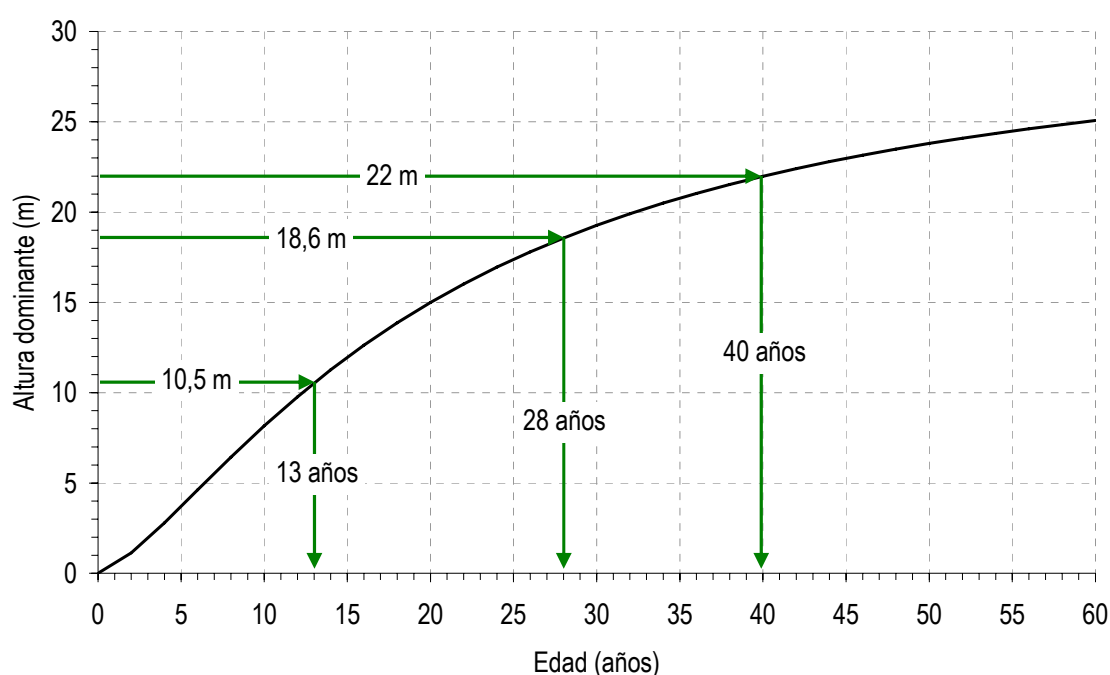


Figura 3.13. Ejemplo de la estimación de las edades asociadas a un determinado esquema de claras obtenido mediante el empleo de un DMD. En este caso se ha supuesto que el rodal de *Betula alba* tiene un índice de sitio de 15 m a la edad de referencia de 20 años.

Tabla 3.13. Valores de las principales variables de rodal (antes y después de la clara) para el ejemplo del esquema de claras de *Betula alba* presentado en la figura 3.12.

Operación	H_0	N		d_g		V		G		IH		t^1	Crecimientos	
		Antes	Desp.	Antes	Desp.	Antes	Desp.	Antes	Desp.	Antes	Desp.		C_m	C_c
Clara (a-b)	10,5	1.150	550	11,6	14,2	53,2	29,3	12,2	8,7	30,2	43,6	13	4,1	--
Clara (b-c)	15,0	550	375	18,5	20,5	89,1	76,1	14,7	12,4	30,5	37,0	20	5,1	7,2
Clara (c-d)	18,6	375	215	24,0	28,0	124,6	99,1	17,0	13,2	29,8	39,4	28	5,4	6,0
Corta final (g)	22,0	215	--	31,7	--	145,7	--	16,9	--	33,3	--	40	5,0	4,0

Nota: t = edad (años); H_0 = altura dominante (m); N = pies/ha; d_g = diámetro medio cuadrático (cm); G = área basimétrica (m^2/ha); V = volumen (m^3/ha); los subíndices e y p hacen referencia a las variables anteriores, pero para la masa extraída y la masa después de clara respectivamente; V_{eac} = volumen extraído acumulado en las claras (m^3/ha); V_t = volumen de la masa total (m^3/ha); C_m = crecimiento medio anual ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$); C_c = crecimiento corriente anual ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$). ¹ La edad se ha obtenido con ayuda de las curvas de calidad de estación de la especie presentadas en la figura 3.2, suponiendo un índice de sitio de 15 m (altura dominante de 15 m a los 20 años).

Tabla 3.14. Tabla generada a partir del DMD para el ejemplo del esquema de claras de *Betula alba* presentado en la figura 3.12, empleando un formato similar al de las tablas de producción.

Variables entrada		Masa principal antes de clara					Masa extraída				Masa principal después de clara				Masa total		
t^1	H_0	N	d_g	G	V	N_e	G_e	V_e	V_{eac}	N_p	d_{gp}	G_p	V_p	V_t	C_m	C_c	
13	11	1.150	11,6	12,2	53,2	600	3,5	13,9	13,9	550	14,2	8,7	39,3	53,2	4,1	--	
20	15	550	18,5	14,7	89,1	175	2,4	13,0	26,9	375	20,5	12,4	76,1	103,0	5,1	7,1	
28	19	375	24,0	17,0	124,6	160	3,8	25,5	52,4	215	28,0	13,2	99,1	151,5	5,4	6,1	
40	22	215	31,7	16,9	145,7	215	16,9	145,7	198,1	0	0,0	0,0	0,0	198,1	5,0	3,9	

Nota: ver definición de variables en la tabla 3.13.

3.4. Bibliografía

- Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study. Pergamon Press, Oxford.
- Barrio-Anta, M. 2003. Crecimiento y producción de masas naturales de *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Barrio-Anta, M., Álvarez González, J.G. 2005. Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules. *Forestry* 78(3), 209-216.
- Barrio-Anta, M., Diéguez-Aranda, U. 2005. Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain). *Eur. J. For. Res.* 124, 19-28.
- Barrio-Anta, M., Balboa-Murias, M.A., Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G. 2006. An ecoregional model for estimating volumen, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *For. Ecol. Manage.* 223, 24-34.
- Becking, J.H. 1954. Einige Gesichtspunkte für die Durchführung von vergleichenden Durchforstungsversuchen in gleichaltrigen Beständen. En: *Proc. IUFRO Congress, Roma, 1953*.
- Beekhuis, J. 1966. Prediction of yield and increment in *Pinus radiata* stands in New Zealand. *N. Z. For. Res. Inst. Tech. Paper* n° 49.

- Cameron, I. 1988. An evaluation of the density management diagram for coastal Douglas-fir. B.C. Min. of For. Lands, Res. Branch, Canadá.
- Castedo-Dorado, F., Álvarez-Álvarez, P., Crecente-Campo, F., Barrio-Anta, M. 2007. Consideración de la estabilidad de la masa en diagramas de manejo de la densidad. Cuadernos de la SECF 23, 63–74.
- Castedo-Dorado, F., Crecente-Campo, F., Álvarez-Álvarez, P., Barrio-Anta, M. 2009. Development of a stand density management diagram for radiate pine stands including assessment of stand stability. *Forestry* 82, 1-16.
- Chauchard, L.M. 2001. Crecimiento y producción de repoblaciones de *Pinus radiata* D. Don en el territorio histórico de Guipúzcoa (País Vasco). Tesis doctorales N° 40, Departamento de Agricultura y Pesca, Gobierno Vasco.
- Davis, K.P. 1966. Forest Management, Regulation and Valuation. McGraw-Hill, USA.
- Dean, J.T., Baldwin, V.C. 1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. USDA Forest Service, Southern Forest Experimental Station, Res. Pap. SO 275.
- Diéguez-Aranda, U., Grandas-Arias, J.A., Álvarez González, J.G., Gadow, K.v. 2006. Site quality curves for birch stands in North-Western Spain. *Silva Fennica* 40(4), 631-644.
- Drew, T.J., Flewelling, J.W. 1979. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. *For. Sci.* 25, 518-532.
- Fernández López, A. 1982. Evolución del crecimiento y productividad del monte bajo de *Eucalyptus globulus* en rotaciones sucesivas. INIA, Departamento Forestal de Lourizán, Pontevedra (inédito).
- Fernández López, A. 1985. Efecto del espaciamiento inicial en la producción de *Eucalyptus globulus*. INIA, Departamento Forestal de Lourizán, Pontevedra (inédito).
- Hart, H.M.J. 1928. Stamtal en dunning. Proefstation Boschswesen, Batavia, Mededelingen 21.
- Long, J.N. 1985. A practical approach to density management. *For. Chron.* 23, 23-26.
- López-Sánchez, C.A. 2009. Estado selvícola y modelos de crecimiento y gestión de plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en España. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Madrigal, A. 1991. Tablas de producción. Seminario sobre inventario y ordenación de montes, Valsaín, Segovia. Vol. II, 32-70.
- Madrigal, A., Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R., Rojo, A. 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid.
- Martínez-Chamorro, E. 2004. Estudio del crecimiento, producción y gestión de las masas de *Pinus sylvestris* L. en Galicia. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Martínez-Chamorro, E. 2007. Situación y posibilidades de gestión de las masas de *Pinus sylvestris* L. repobladas en Galicia. *Montes* 87, 21-27.
- Newton, P.F. 1997. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning. *For. Ecol. Manage.* 98, 251-265.
- Newton, P.F. 2003. Yield prediction errors of a stand density management program for black spruce and consequences for model improvement. *Can. J. For. Res.* 33, 490-499.
- Pita, P.A. 1991. Potencialidad de las estaciones forestales. Curvas de calidad. Seminario sobre Inventario y Ordenación de Montes, Valsaín, Segovia, Vol. I, 18-39.

- Reineke, L.H. 1933. Perfecting a stand density index for even-aged forest. J. Agr. Res. 46, 627-638.
- Rodríguez Soalleiro, R. 1995. Crecimiento y producción de masas forestales regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Alternativas selvícolas posibles. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rojo, A., Álvarez González, J.G., Grandas-Arias, J.A., Diéguez-Aranda, U. 2005a. Tablas de producción de selvicultura media para el abedul (*Betula alba* L.) en Galicia. IV Congreso Forestal Nacional. Zaragoza, 26-30 septiembre 2005.
- Sánchez, F. 2001. Estudio de la calidad de estación, crecimiento, producción y selvicultura de *Pinus radiata* en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Sánchez, F., Rodríguez Soalleiro, R., Rojo, A., Álvarez González, J.G., López-Sánchez, C.A., Gorgoso, J.J., Castedo-Dorado, F. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. 12(2), 65–83.
- Vannière, B. 1984. Tables de production pour les forêts françaises. ENGREF, INRA, ONF 2ª Ed. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy.
- Wilson, F.G. 1946. Numerical expression of stocking in terms of height. J. For. 44, 758-761.
- Yoda, K., Kira, H., Ogawa, H., Hozumi, K. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. J. Biol. Osaka City Univ. 14, 107-129.
- Zeide, B. 2004. Optimal stand density: a solution. Can. J. For. Res. 34, 846-854.

4. Modelos dinámicos de crecimiento

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan y describen las versiones más recientes de los modelos dinámicos de crecimiento desarrollados en el seno del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela, para las tres especies de pino con mayor representación en Galicia (*Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris*). Para facilitar su aplicación práctica, dichos modelos se han implementado en el simulador informático de crecimiento y producción de rodales forestales GesMO® 2009, que se incluye en el CD-ROM que acompaña al libro.

Como ya se ha comentado en el capítulo 1, una de las posibles clasificaciones de los modelos forestales de crecimiento se basa en la mayor o menor rigidez para simular la evolución de la densidad de un rodal en el tiempo, en función de si se dispone o no de datos reales de crecimiento y de, en el primero de los casos, si se han tenido en cuenta o no dichos crecimientos a la hora de aplicar las metodologías de ajuste correspondientes. Según este criterio, se distinguen modelos de crecimiento “estáticos” (p. ej., tablas de producción, ver capítulo 3), que representan únicamente una de las posibles evoluciones del número de pies por hectárea, y modelos “dinámicos”, que permiten simular diferentes evoluciones de la densidad en el tiempo y, por tanto, un amplio abanico de alternativas selvícolas.

La principal ventaja de los modelos dinámicos es que permiten simular con mayor flexibilidad, y de una manera más realista que los modelos estáticos, distintas alternativas de gestión (densidades de plantación, tipo, peso y edad de las claras, y edad de la corta final), así como analizar sus posibles consecuencias en términos de crecimiento y producción (p. ej., turnos óptimos de corta si se vincula el modelo de crecimiento a programas de análisis económico adecuados). Para ello, es conveniente que estén implementados en simuladores informáticos (como GesMO® 2009), para facilitar su uso a los selvicultores, gestores forestales y otros potenciales usuarios.

Los modelos de carácter dinámico predicen fundamentalmente tasas de cambio, es decir, el crecimiento de ciertas variables que definen el estado del sistema (p. ej., la altura dominante, el área basimétrica y el número de pies por hectárea) bajo condiciones distintas de densidad. La evolución del rodal en el tiempo se obtiene a partir de dichas ecuaciones, bien por integración o por la aplicación sucesiva de incrementos (Alder, 1980).

La teoría del espacio de estados, cuyo principio debe buscarse en la teoría matemática de sistemas, ha resultado adecuada para el desarrollo de modelos dinámicos de crecimiento de rodales forestales. Los fundamentos básicos de esta teoría son (García, 1988):

- ✓ Una descripción del estado del rodal en un momento dado (el “estado” del sistema), para lo cual se emplean variables dasométricas que lo definan y mediante las cuales se pueden determinar otras variables de interés. La determinación de estas últimas variables se realiza con las denominadas funciones de salida.
- ✓ Unas funciones de transición, que definen la tasa de cambio del sistema y que dependen del estado inicial. Estas funciones están representadas en el modelo por ecuaciones de incremento (ecuaciones diferenciales) o en forma integrada (ecuaciones en diferencias algebraicas).
- ✓ Unas funciones de control, que modifican los valores de las variables del rodal en función de los cambios instantáneos de estado originados por tratamientos selvícolas o por otras perturbaciones, como por ejemplo enfermedades o incendios forestales.

En otras palabras, la teoría del espacio de estados asume que el comportamiento de un sistema que considere el tiempo puede ser estimado mediante la descripción de su estado actual, habitualmente a partir de una lista finita de variables de estado (el denominado vector de estado), y la tasa de cambio del estado como una función de estas variables en un instante determinado.

De una forma simplificada, el estado de un sistema en un momento dado puede definirse como la información necesaria para determinar el comportamiento del sistema desde ese instante en adelante; es decir, dado el instante actual, el futuro no depende del pasado (García, 1994). Por ejemplo, si se caracteriza el estado de los rodales de una especie en un momento dado por su altura dominante, su área basimétrica y su número de árboles por hectárea, dos rodales con los mismos valores para estas variables en un determinado momento se comportarán en el futuro de la misma manera, no importando cómo llegaron a ese estado.

Además, según la teoría del espacio de estados, es posible estimar otras variables de interés a partir de los valores de las variables de estado en un determinado instante mediante las denominadas funciones de salida. Estas funciones de salida representan, entonces, la conexión entre las variables de estado y otras variables requeridas para la gestión forestal (García, 1994).

En la selección de las variables de estado debe tenerse en cuenta el principio de parsimonia (García, 1988, Gadow, 1996): el modelo ideal es el más sencillo que sea capaz de describir el fenómeno biológico que se pretende representar. En el caso de la selección de variables de estado, este principio implica que no se deben usar más variables de las necesarias para determinar con suficiente detalle el comportamiento futuro del sistema.





Teniendo en cuenta este criterio, en el caso de rodales no aclarados un vector de estado bidimensional que incluyese la altura dominante y el área basimétrica como variables explicativas debería ser suficiente para describir el estado del rodal en un determinado momento (Pienaar y Turnbull, 1973). Sin embargo, en situaciones que cubren un amplio rango de regímenes selvícolas

se hace necesaria la inclusión de una tercera variable de estado, como el número de pies por hectárea (García, 1994, 2003). La inclusión de una cuarta variable de estado que represente el grado de ocupación del suelo o el grado de cubierta de las copas puede ser interesante bajo determinadas circunstancias, como por ejemplo tras una clara o una poda muy fuertes, para tener en cuenta el hecho de que durante un tiempo tras la intervención los árboles no ocuparán completamente el espacio adicional que se les proporciona.

4.1.1. Estructura de los modelos dinámicos de crecimiento desarrollados

La estructura de los modelos dinámicos de crecimiento que se han elaborado para las tres especies de pino más importantes de Galicia (*Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris*) está basada en la mencionada teoría del espacio de estados. Teniendo en cuenta las características de los rodales en los que habitualmente se encuentran las especies estudiadas, que suelen ser puros, coetáneos o regulares y en los que se llevan a cabo claras de diferente peso y frecuencia, se han considerado necesarias tres variables de estado (altura dominante, área basimétrica y número de pies por hectárea) para definir adecuadamente sus condiciones en un determinado instante.

De una forma sintética, en los modelos dinámicos que se han desarrollado se parte de la situación de un rodal en un instante determinado t_1 definido por las variables de estado altura dominante H_{01} , área basimétrica G_1 y número de pies por hectárea N_1 , y se pretende llegar a estimar el volumen por hectárea, para una edad de proyección dada t_2 . Las tres variables de estado mencionadas se proyectan hacia el futuro mediante sus correspondientes funciones de transición. El volumen total del rodal V , o hasta un determinado diámetro en punta delgada V_i , se obtiene mediante funciones de salida. Estas funciones pueden utilizarse, asimismo, para estimar otras variables de interés en la gestión, como la biomasa acumulada W o la cantidad de carbono secuestrado C (totales o por fracciones). El crecimiento se obtiene por diferencia entre los valores de las variables en el instante final e inicial de la proyección.

La figura 4.1 muestra la estructura básica de los modelos de crecimiento elaborados. Tanto en esta figura como en las restantes del capítulo, las variables de entrada se han denotado por el símbolo . Los procesos que utilizan funciones matemáticas para transformar variables de entrada en variables intermedias o en variables de salida se han indicado mediante el símbolo . Por último, las variables resultado o de salida se han indicado mediante el símbolo . Éstas variables pueden ser a su vez variables de entrada en otras funciones, en cuyo caso se han denotado mediante el símbolo .

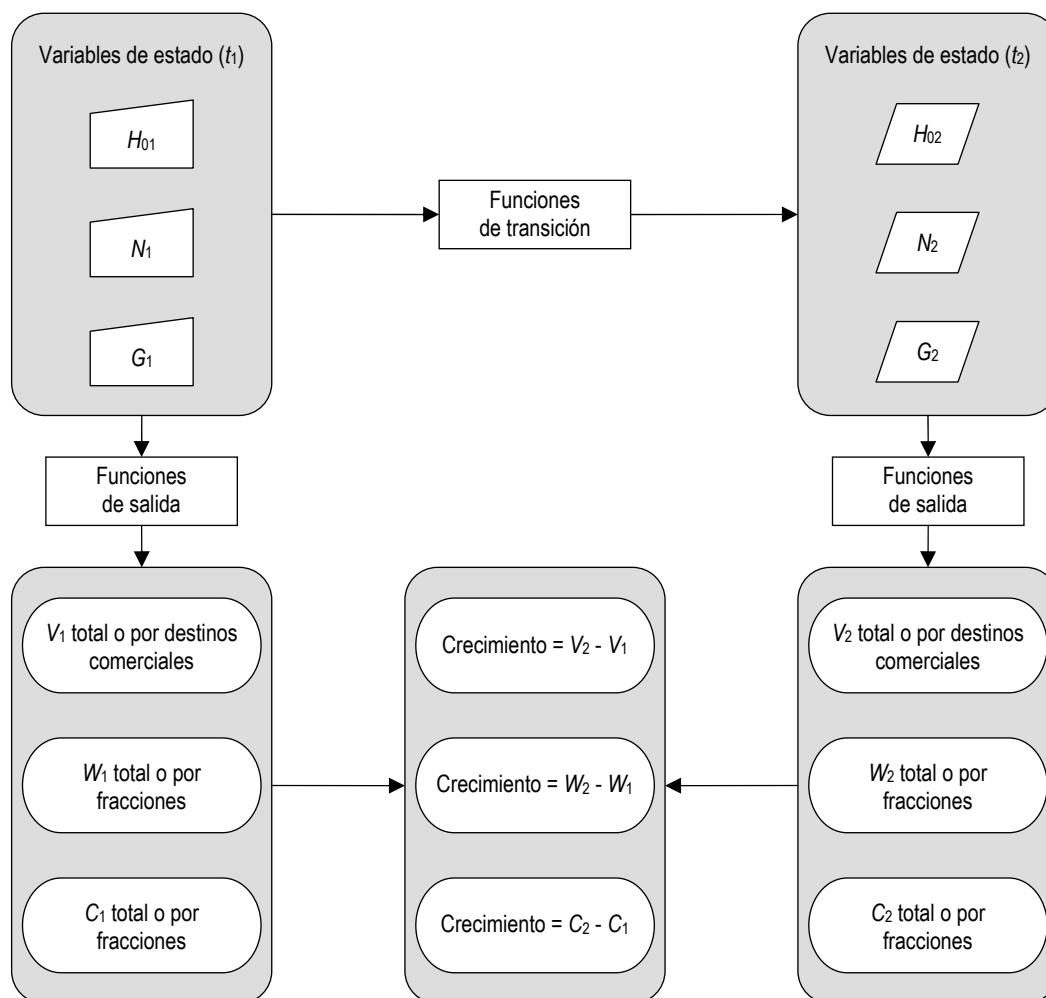


Figura 4.1. Estructura básica de los modelos dinámicos de crecimiento desarrollados. Nota: t_1 , t_2 = edad del rodal al inicio y al final de la proyección, respectivamente; H_{01} , H_{02} , N_1 , N_2 , G_1 , G_2 , V_1 , V_2 , W_1 , W_2 , C_1 , C_2 = altura dominante, número de pies/ha, área basimétrica, volumen/ha, biomasa/ha y carbono/ha a las edades inicial t_1 y final t_2 de la proyección, respectivamente.

4.1.2. Funciones de transición

Como ya se ha indicado, la estructura de los modelos dinámicos de crecimiento elaborados se basa en el empleo de tres variables de estado para definir la situación de un rodal en un determinado instante, por lo que es necesario ajustar tres funciones de transición para proyectar cada una de esas variables hacia el futuro.

La alternativa más empleada para obtener este tipo de funciones de transición es la utilización de ecuaciones dinámicas como las descritas en el apartado 2.2.2, ya que cumplen las propiedades indicadas de ser invariantes con respecto a la edad de referencia y al intervalo de proyección.

A continuación se exponen los diagramas de flujo correspondientes a las tres funciones de transición de los modelos de crecimiento. En ellas son siempre variables de entrada obligatorias

las edades de inicio t_1 y final t_2 de la simulación. La toma de decisiones, en circunstancias de varias alternativas posibles, se ha representado mediante el símbolo \diamond .

La función de transición de la altura dominante se explica en detalle en el capítulo 2, dedicado a la calidad de estación. Dentro de un modelo dinámico, esta función, cuya formulación general es $H_{02} = f(t_2, t_1, H_{01})$, se suele utilizar para estimar la altura dominante H_{02} de un rodal a una edad t_2 determinada, a partir de la edad t_1 y la altura dominante H_{01} en un momento inicial. Asimismo, también se utiliza para estimar el índice de sitio IS a partir de un par de datos edad-altura dominante dado (t_1, H_{01}) , para lo que basta con sustituir en la misma ecuación H_{02} por IS y t_2 por la edad de referencia t_{ref} seleccionada para la especie (figura 4.2).

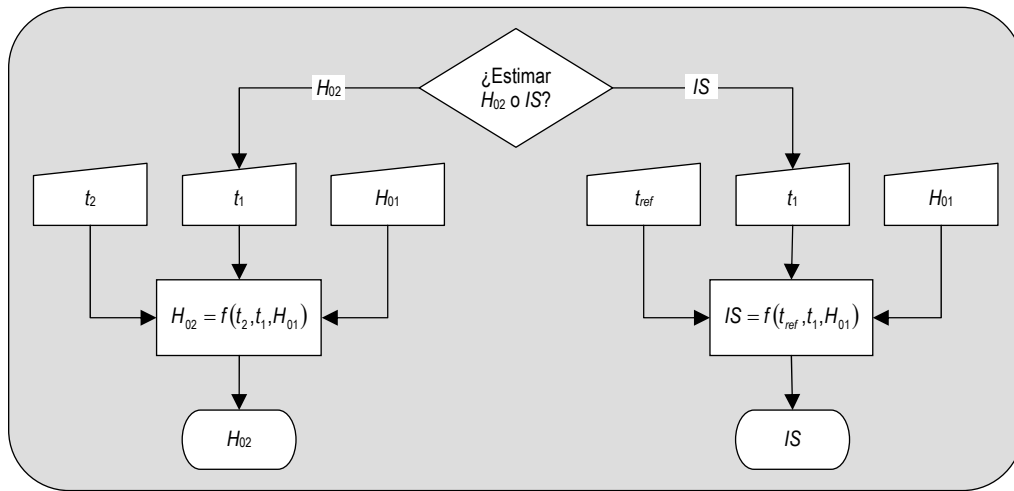


Figura 4.2. Diagrama de flujo de la función de transición de la altura dominante: proyección en el tiempo de la altura dominante y estimación del índice de sitio de un rodal. Nota: IS = índice de sitio; t_{ref} = edad de referencia; ver notación del resto de variables en la figura 4.1.

De forma análoga a la altura dominante, el área basimétrica del rodal se proyecta en el tiempo mediante una función de transición que depende, al menos, del área basimétrica inicial G_1 y de las edades inicial t_1 y final t_2 de la proyección (figura 4.3).

Es recomendable la inclusión en el modelo dinámico de una función que permita estimar el área basimétrica inicial del rodal (figura 4.3) y tener así un punto de partida para comenzar la simulación cuando no se conoce el valor real de dicha variable. Esta función de inicialización proporciona estimaciones sujetas a error, por lo que únicamente debe utilizarse cuando el rodal no esté todavía establecido o cuando no se disponga de un inventario que permita determinar el área basimétrica real del rodal.

En cuanto a la evolución del número de pies por hectárea, si no se efectúan claras estará determinada por la mortalidad natural existente, definida por una función de transición para dicha variable. Esta función (denominada función de mortalidad natural) permite estimar la disminución del número de pies debida fundamentalmente a la competencia por agua, luz y nutrientes entre los árboles de un rodal. Las variables explicativas incluidas en una función de mortalidad son las

edades inicial t_1 y final t_2 de proyección, el número de pies inicial N_1 y, en ocasiones, el índice de sitio IS (figura 4.4).

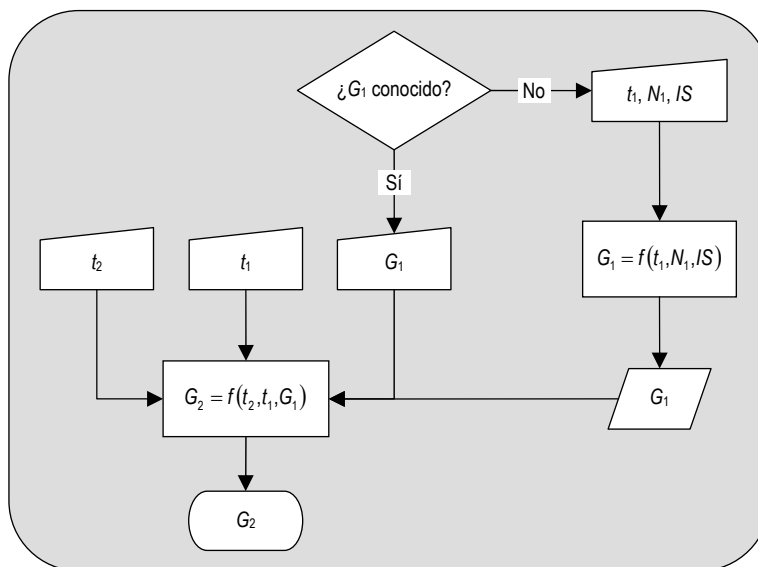


Figura 4.3. Diagrama de flujo de la función de transición del área basimétrica. Si el área basimétrica inicial G_1 es desconocida se usará la función de inicialización. Nota: ver notación de variables en las figuras 4.1 y 4.2.

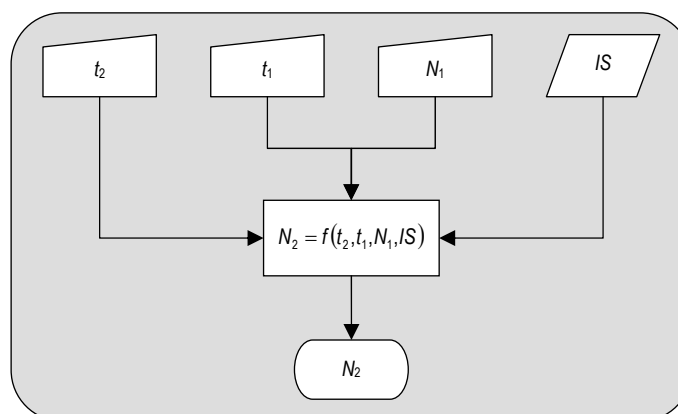


Figura 4.4. Diagrama de flujo de la función de transición del número de pies por hectárea. Nota: ver notación de variables en las figuras 4.1 y 4.2.

Si se realizan claras en el rodal y en ellas se eliminan los árboles más susceptibles de morir por competencia (situación habitual en las claras por lo bajo), se puede suponer que la disminución del número de pies por mortalidad natural tras la clara es despreciable (al menos durante un determinado número de años).

4.1.3. Funciones de salida

A partir del valor de las variables de estado en cualquier instante es posible conocer otras variables características del rodal (p. ej., el volumen total o comercial, la altura media, el diámetro

medio cuadrático, la biomasa total o por fracciones, el contenido de carbono, etc.) mediante las denominadas funciones salida.

Habitualmente, la variable de mayor interés es el volumen de madera del rodal (bien sea el total o el clasificado según destinos comerciales), por lo que en este trabajo sólo se describirá de forma pormenorizada la estimación de dicha variable. La estimación del volumen de un rodal en un modelo dinámico de crecimiento puede llevarse a cabo mediante diferentes metodologías, siendo las más comunes la utilización de tarifas de cubicación de rodal o el uso de procesos de desagregación.

Las tarifas de cubicación de rodal proporcionan directamente el volumen total del mismo a partir de variables de estado (altura dominante, área basimétrica y número de pies por hectárea) y, en algún caso, de otras (p. ej., la edad o el índice de sitio). Es posible también conocer el volumen comercial de un rodal V_i hasta un determinado diámetro límite de utilización d_i , mediante un tipo especial de tarifas de cubicación denominadas tarifas de razón de rodal. En el apartado 3.2.4 dedicado a las relaciones fundamentales de las tablas de producción se analizan más detalladamente estas funciones de salida. Las principales ventajas de las tarifas de cubicación de rodal son su sencillez y la rapidez de cálculo, mientras que su principal inconveniente es que no permiten estimar el volumen clasificado por clases de tamaño de los árboles.

La metodología de desagregación conlleva el empleo combinado de una función que permite estimar el número de pies de cada clase diamétrica (ver capítulo 6), una ecuación altura-diámetro (ver capítulo 7) y una tarifa de cubicación de árbol individual o una función de perfil de tronco (ver capítulo 8) (Castedo-Dorado et al., 2005). En el proceso de desagregación, la información de las variables de estado consideradas en este capítulo (altura dominante, área basimétrica y número de pies por hectárea), o de otras que caracterizan el rodal en un instante cualquiera, se utiliza para generar matemáticamente la distribución diamétrica y estimar la altura de cada clase dimensional. En la figura 4.5 se muestra la estructura del sistema de desagregación utilizado en los modelos dinámicos de crecimiento que se presentan en este libro.

Una vez conocida la distribución diamétrica del rodal (en este caso se han considerado clases diamétricas de 1 cm de amplitud), el volumen total y/o comercial unitario del árbol representativo de cada clase diamétrica se estima mediante una tarifa de cubicación de volumen total o una función de perfil (ver capítulo 8), según el caso, a partir del valor de su diámetro normal y de su altura, generada mediante una ecuación altura-diámetro (ver capítulo 7). El volumen total y/o comercial del rodal se obtiene multiplicando el correspondiente volumen unitario por el número de pies generado para cada clase diamétrica y agregando la información resultante. La principal ventaja de esta metodología es que proporciona información del volumen por clases de tamaño de los árboles. En la figura 4.6 se muestra el diagrama de flujo del sistema de estimación de volumen total y comercial utilizado en los modelos dinámicos de crecimiento desarrollados en este capítulo. La estimación de otras variables de interés del rodal, como la biomasa o el contenido en carbono, se realizaría de forma similar a lo indicado anteriormente, pero mediante las ecuaciones que se

presentan en el capítulo 10, que dependen del diámetro normal y, en ocasiones, de la altura total del árbol.

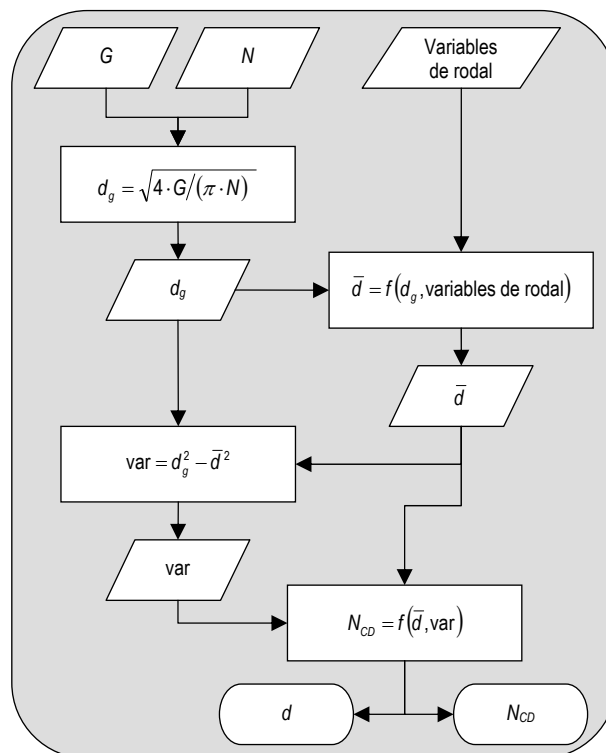


Figura 4.5. Diagrama de flujo del sistema de desagregación utilizado. Nota: G = área basimétrica; N = número de pies/ha; d_g = diámetro medio cuadrático; \bar{d} = diámetro medio aritmético; var = varianza diamétrica; N_{CD} = número de pies/ha en la clase diamétrica; d = diámetro normal del árbol representativo de la clase diamétrica.

4.1.4. Fuentes de datos para elaborar modelos dinámicos de crecimiento

El ajuste de las funciones de transición requiere contar con datos de las variables dasométricas de interés (altura dominante, área basimétrica y número de pies por hectárea en los modelos dinámicos que se presentan), medidas al menos en dos instantes diferentes en las parcelas de investigación, lo que posibilita disponer de datos de crecimiento.

Esta información se puede obtener de parcelas de intervalo, medidas en dos ocasiones, o permanentes, medidas al menos tres veces (Gadow et al., 1999). La duración del intervalo entre las mediciones depende de la rapidez de crecimiento de la especie. Para absorber las condiciones climáticas anormales que ocurren en determinados años, parece conveniente considerar intervalos de al menos tres años en especies de crecimiento rápido (p. ej., *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster* o *Pinus radiata*) y al menos cinco años para el resto de especies (p. ej., *Pinus sylvestris* o *Quercus robur*). Durante el intervalo de tiempo entre dos mediciones no deben existir perturbaciones que alteren el normal desarrollo del rodal (ataques de plagas o enfermedades, daños por incendios forestales, podas de gran intensidad o intervenciones de claras), lo que permite explicar de manera precisa el cambio de estado del rodal como reacción al estado inicial en función exclusivamente de su propio crecimiento (Gadow et al., 1999).

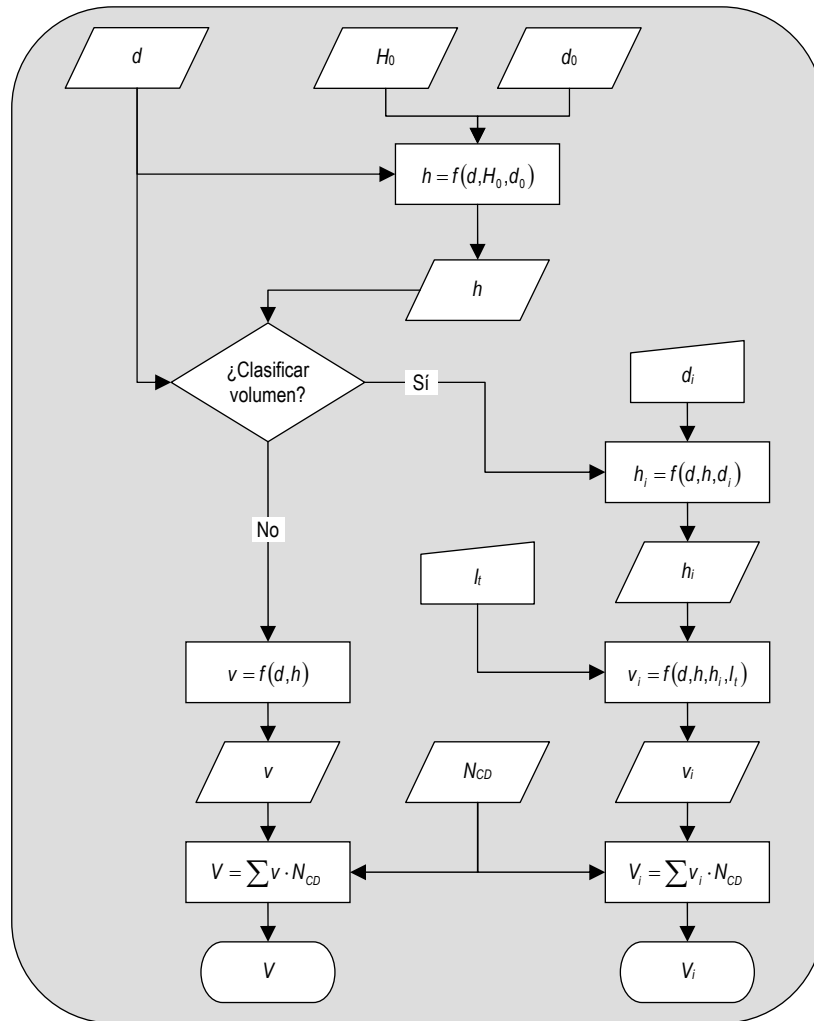


Figura 4.6. Diagrama de flujo del sistema de estimación de volumen total y comercial utilizado. Nota: d = diámetro normal del árbol representativo de la clase diamétrica; H_0 = altura dominante; d_0 = diámetro dominante; h = altura total del árbol representativo de la clase diamétrica; d_i = diámetro límite en punta delgada; h_i = altura sobre el suelo a la que se alcanza el diámetro límite d_i ; l_i = longitud de troza; v = volumen total del árbol representativo de la clase diamétrica; v_i = volumen comercial del árbol representativo de la clase diamétrica hasta un determinado diámetro límite d_i ; N_{cd} = número de pies/ha en la clase diamétrica; V = volumen total del rodal; V_i = volumen comercial del rodal.

4.2. Material y métodos

4.2.1. Datos

En este capítulo se describen las versiones más recientes de los modelos dinámicos de crecimiento desarrollados por miembros de la UXFS para las tres principales especies de pino de Galicia: *Pinus pinaster* (elaborado específicamente para este libro), *Pinus radiata* (cuya última versión se describe en Castedo-Dorado et al., 2007a) y *Pinus sylvestris* (cuya versión más

reciente está recogida en Diéguez-Aranda et al., 2006). Las ecuaciones que se presentan coinciden con las recogidas en las publicaciones indicadas, excepto las correspondientes a las funciones de perfil del tronco, que se han revisado para este trabajo.

El conjunto de datos utilizado está compuesto por las mediciones realizadas en 398 parcelas muestreadas en rodales regulares monoespecíficos de esas tres especies en Galicia. Para el modelo de *Pinus pinaster* se han utilizado datos ajenos a la red de parcelas de experimentación de la UXFS, pues ya existía información suficiente disponible. En el caso de *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris* sí se han utilizado los datos recogidos en la red de parcelas instalada por la UXFS, que se ha descrito en el capítulo 1.

Para elaborar el modelo de la especie *Pinus pinaster* se han utilizado datos de 153 parcelas procedentes de tres fuentes:

- ✓ 148 inventarios de 62 parcelas instaladas por el Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE) para elaborar tablas de producción para la especie (Echeverría y De Pedro, 1948). Algunas de estas parcelas fueron medidas hasta en cuatro ocasiones.
- ✓ 249 inventarios procedentes de 10 sitios de ensayo de claras instalados por el IFIE entre 1965 y 1972. En cada sitio de ensayo se instalaron cuatro parcelas correspondientes a distintos tratamientos: control (sin clara), clara por lo bajo débil, clara por lo bajo moderada y clara por lo bajo fuerte (que se correspondieron con la extracción de aproximadamente el 15%, 30% y 45% del área basimétrica, respectivamente). Las parcelas fueron clareadas inmediatamente después de su establecimiento y fueron remedidas en diferentes intervalos de tiempo.
- ✓ 178 inventarios de 51 parcelas instaladas por el Centro de Investigaciones Forestales (CIF) de Lourizán con el objetivo de determinar la calidad de estación y el efecto de la fertilización sobre el crecimiento de las masas de esta especie (Bará y Toval, 1983). Algunas de estas parcelas fueron medidas hasta en cuatro ocasiones.

La base de datos utilizada cubre una amplia gama de condiciones estacionales en las dos zonas que fueron definidas para *Pinus pinaster* en Galicia por Vega Alonso et al. (1993): costa e interior (ver apartado 1.3 y figura 1.13). Algunas ecuaciones del modelo dinámico son diferentes para cada zona, en concordancia con las diferentes pautas de crecimiento observadas en cada una de ellas.

Una gran parte de los datos utilizados en la elaboración del modelo dinámico de crecimiento para rodales gallegos de *Pinus radiata* fueron recogidos en la red de 223 parcelas de investigación de la especie que la UXFS comenzó a instalar en 1995 y que mantiene en parte actualmente para elaborar modelos forestales de crecimiento (Castedo-Dorado, 2004; Castedo-Dorado et al., 2007a; Crecente-Campo, 2008). Como ya se ha comentado en el capítulo 1, una submuestra de 155 parcelas de las inicialmente establecidas fue remedida en el invierno de 1998-99, y posteriormente 46 de ellas volvieron a medirse por tercera vez en el invierno de 2004-05. Asimismo, entre los tres inventarios, 22 parcelas fueron clareadas por lo bajo

débil o moderadamente, por lo que fueron medidas justo antes y después de la realización de la clara.

También se utilizaron datos procedentes de 24 parcelas del ensayo de claras establecido por la UXFS en 2003 en un rodal de 12 años en Begonte (Lugo), ya descrito en el capítulo 1. En este caso, las parcelas fueron clareadas inmediatamente después de la instalación y se remidieron dos años después.

Para *Pinus sylvestris* también se utilizaron los datos de la red de parcelas de investigación del crecimiento instalada y mantenida por la UXFS (Diéguez-Aranda, 2004). En este caso se contó con datos procedentes de la primera remedición de 68 de las 155 parcelas establecidas originalmente. La instalación de las parcelas se llevó a cabo en el invierno de 1996-97, y la remedición posterior en el invierno de 2002-03 (ver capítulo 1).

La base de datos utilizada cubre un amplio abanico de edades, densidades y condiciones estacionales para todas las especies estudiadas, aunque en el caso de *Pinus sylvestris* las parcelas no superaron los 55 años en el momento de su medición, por lo que el rango de edades muestreadas no abarca toda la duración del turno previsible para la especie. En la tabla 4.1 se presentan los estadísticos descriptivos más importantes de la muestra de datos utilizada para cada especie, una vez realizada una depuración de datos anómalos.

Tabla 4.1. Estadísticos descriptivos de las variables de rodal empleadas en la construcción de los modelos dinámicos de crecimiento.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica
<i>Pinus pinaster</i> (costa) (65 parcelas)	<i>t</i>	16,7	8	39	5,6
	<i>H</i> ₀	11,7	4,7	24	3,6
	<i>G</i>	27,4	3,6	56,5	10,2
	<i>N</i>	1.990	430	6.576	983,4
<i>Pinus pinaster</i> (interior) (88 parcelas)	<i>t</i>	19,3	9	40	4,9
	<i>H</i> ₀	10,6	4,6	20,4	2,2
	<i>G</i>	28,8	5,1	72,5	12,6
	<i>N</i>	1.737	654	3.142	539
<i>Pinus radiata</i> (179 parcelas)	<i>t</i>	21,9	5	47	7,8
	<i>H</i> ₀	20,4	5,9	35,2	5,1
	<i>G</i>	32,6	5,1	87,1	10,4
	<i>N</i>	925	192	2.048	406
<i>Pinus sylvestris</i> (68 parcelas)	<i>t</i>	36,2	12	55	7,8
	<i>H</i> ₀	13,8	4,0	24,0	4,1
	<i>G</i>	39,4	4,2	72,6	12,9
	<i>N</i>	1.340	600	2.112	383

Nota: *t* = edad (años); *H*₀ = altura dominante (m); *G* = área basimétrica (m²/ha); *N* = número de pies por hectárea.

4.3. Resultados

En las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran las funciones elegidas para formar parte de los modelos dinámicos de crecimiento para las tres especies de pino estudiadas (la notación y las unidades de las variables pueden consultarse en las figuras 4.1, 4.2, 4.5 y 4.6, así como en el anexo I). Para su exposición se ha seguido el orden lógico en su utilización en el modelo dinámico: las funciones de transición y las funciones de salida.

Se ha optado por presentar las funciones de salida para la variable volumen del rodal asociadas con las dos alternativas de cubicación que se han comentado al comienzo del capítulo: tarifas de cubicación de rodal y sistema de desagregación (ver capítulos 6, 7 y 8), si bien la aplicación informática GesMO® 2009, que se incluye en el CD-ROM que acompaña a este libro, sólo considera la cubicación mediante el sistema de desagregación.

En las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se representan gráficamente algunos ejemplos resultantes de aplicar las funciones de transición correspondientes a las variables de estado área basimétrica y número de pies por hectárea, para *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris* respectivamente. Las curvas obtenidas de evolución de estas variables se han superpuesto sobre las trayectorias de los valores observados en las parcelas experimentales. Para la especie *Pinus pinaster* no se ha elaborado una función de mortalidad natural, ya que apenas existe disminución del número de pies por competencia en los rodales de esta especie, incluso a elevadas densidades (Rodríguez Soalleiro y Madrigal, 2008).

La información sobre las funciones de transición correspondientes a la variable de estado altura dominante se expone en el capítulo 2, dedicado a la calidad de estación. Las funciones de salida de desagregación (para la estimación del diámetro medio aritmético), altura-diámetro generalizada y perfil del tronco (que incluye la tarifa de cubicación de árbol individual) se describen, respectivamente, en los capítulos 6, 7 y 8.

Tabla 4.2. Resumen de las funciones que constituyen el modelo dinámico de crecimiento para *Pinus pinaster*.

Funciones de transición	Función de transición para la altura dominante
	$H_{02} = \frac{72,69 - 27,86 \cdot I + X_0}{1 - (2,993 + 5,084 \cdot I) \cdot X_0 \cdot t_2^{-1,486}}, \text{ donde } X_0 = \frac{H_{01} - 72,69 + 27,86 \cdot I}{1 + (2,993 + 5,084 \cdot I) \cdot H_{01} \cdot t_1^{-1,486}}$
	Función de transición para el número de pies por hectárea
	No disponible: apenas existe disminución del número de pies por competencia en las parcelas estudiadas
Funciones de salida	Función de transición para el área basimétrica
	$G_2 = \exp(X_0) \cdot \exp\left(-(-167,5 + (999,1 - 50,34 \cdot I)/X_0) \cdot t_2^{-0,8936}\right), \text{ donde}$
	$X_0 = \frac{t_1^{-0,8936}}{2} \cdot \left(-167,5 + t_1^{0,8936} \cdot \ln(G_1) + \sqrt{4 \cdot (999,1 - 50,34 \cdot I) \cdot t_1^{0,8936} + (167,5 - t_1^{0,8936} \cdot \ln(G_1))^2}\right)$
	Función de inicialización del área basimétrica
Funciones de salida	$G = \exp(X_0) \cdot \exp\left(-(-167,5 + (999,1 - 50,34 \cdot I)/X_0) \cdot t^{-0,8936}\right), \text{ donde}$
	$X_0 = (4,363 - 0,1489 \cdot I) \cdot IS^{0,07383}$
	Desagregación (diámetro medio aritmético)
	$\bar{d} = d_g - \exp\left(-0,4456 - \frac{10,99}{t} + 0,02221 \cdot H_0\right)$
Funciones de salida	Función altura-diámetro generalizada
	$h = \left(1,3^{1,894+1,469 \cdot I} + (H_0^{1,894+1,469 \cdot I} - 1,3^{1,894+1,469 \cdot I})^{1/(1,894+1,469 \cdot I)}\right) \times \frac{1 - \exp(-(0,04611 - 0,04734 \cdot I) \cdot d)}{1 - \exp(-(0,04611 - 0,04734 \cdot I) \cdot d_0)}$
	Función de perfil del tronco y tarifa de cubicación de árbol individual
	$d_i = c_1 \cdot \sqrt{H^{(k-b_1)/b_1} \cdot (1-q)^{(k-\beta)/\beta} \cdot \alpha_1^{l_1+l_2} \cdot \alpha_2^{l_2}}; k = \pi/40.000; q = h_i/h;$
$\begin{cases} l_1 = 1 \text{ si } p_1 \leq q \leq p_2; 0 \text{ en caso contrario} \\ l_2 = 1 \text{ si } p_2 < q \leq 1; 0 \text{ en caso contrario} \end{cases}; \beta = b_1^{1-(l_1+l_2)} \cdot b_2^{l_1} \cdot b_3^{l_2}; \alpha_1 = (1-p_1)^{\frac{(b_2-b_1)k}{b_1 \cdot b_2}};$	
$\alpha_2 = (1-p_2)^{\frac{(b_3-b_2)k}{b_2 \cdot b_3}}; r_0 = (1-h_{st}/h)^{k/b_1}; r_1 = (1-p_1)^{k/b_1}; r_2 = (1-p_2)^{k/b_2};$	
$c_1 = \sqrt{\frac{a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2-k/b_1}}{b_1 \cdot (r_0-r_1) + b_2 \cdot (r_1-\alpha_1 \cdot r_2) + b_3 \cdot \alpha_1 \cdot r_2}}; v = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2}$	
$a_0 = 3,974 \cdot 10^{-5}; a_1 = 1,876; a_2 = 1,079; b_1 = 1,003 \cdot 10^{-5}; b_2 = 3,695 \cdot 10^{-5}; b_3 = 2,910 \cdot 10^{-5};$	
$p_1 = 0,1013; p_2 = 0,7233$	
Tarifa de cubicación de rodal	
$V = 5,480 \cdot 10^{-4} \cdot d_g^{1,430-0,07553 \cdot I} \cdot H_0^{1,220} \cdot N^{0,7681+0,02974 \cdot I}$	

Nota: *I* = variable *dummy* (ficticia) que toma el valor 1 para la zona costera y 0 para la zona interior.

Tabla 4.3. Resumen de las funciones que constituyen el modelo de crecimiento para *Pinus radiata*.

Funciones de transición	Función de transición para la altura dominante
	$H_{02} = H_{01} \cdot \left(\frac{1 - \exp(-0,06738 \cdot t_2)}{1 - \exp(-0,06738 \cdot t_1)} \right)^{(-1,755 + 12,44/X_0)}$ <p>donde $X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left((\ln H_{01} + 1,755 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln H_{01} + 1,755 \cdot L_0)^2 - 4 \cdot 12,44 \cdot L_0} \right)$ y</p> $L_0 = \ln(1 - \exp(-0,06738 \cdot t_1))$
	Función de transición para el número de pies/ha
	$N_2 = (N_1^{-0,3161} + 1,053 \cdot t_2^{-100} - 1,053 \cdot t_1^{-100})^{-1/0,3161}$
Funciones de salida	Función de transición para el área basimétrica
	$G_2 = \exp(X_0) \cdot \exp(-(-276,1 + 1,391/X_0) \cdot t_2^{-0,9233})$, donde $X_0 = \frac{t_1^{-0,9233}}{2} \cdot \left(-276,1 + t_1^{0,9233} \cdot \ln(G_1) + \sqrt{4 \cdot 1,391 \cdot t_1^{0,9233} + (276,1 - t_1^{0,9233} \cdot \ln(G_1))^2} \right)$
	Función de inicialización del área basimétrica
	$G = -52,23 + 2,676 \cdot t + 1,306 \cdot IS + 0,01008 \cdot N$
Funciones de salida	Desagregación (diámetro medio aritmético)
	$\bar{d} = d_g - \exp\left(0,1449 - \frac{19,76}{t} + 0,0001345 \cdot N + 0,03264 \cdot IS\right)$
	Función altura-diámetro generalizada
	$h = \left(1,3^{1,633} + (H_0^{1,633} - 1,3^{1,633}) \cdot \frac{1 - \exp(-0,02961 \cdot d)}{1 - \exp(-0,02961 \cdot d_0)} \right)^{1/1,633}$
Funciones de salida	Función de perfil del tronco y tarifa de cubicación de árbol individual
	$d_i = c_1 \cdot \sqrt{H^{(k-b_1)/b_1} \cdot (1-q)^{(k-\beta)/\beta} \cdot \alpha_1^{l_1+l_2} \cdot \alpha_2^{l_2}} ; k = \pi/40.000 ; q = h_i/h ;$ $\begin{cases} l_1 = 1 \text{ si } p_1 \leq q \leq p_2 ; 0 \text{ en caso contrario} \\ l_2 = 1 \text{ si } p_2 < q \leq 1 ; 0 \text{ en caso contrario} \end{cases} ; \beta = b_1^{1-(l_1+l_2)} \cdot b_2^{l_1} \cdot b_3^{l_2} ; \alpha_1 = (1-p_1)^{\frac{(b_2-b_1)k}{b_1 \cdot b_2}} ;$ $\alpha_2 = (1-p_2)^{\frac{(b_3-b_2)k}{b_2 \cdot b_3}} ; r_0 = (1-h_{st}/h)^{k/b_1} ; r_1 = (1-p_1)^{k/b_1} ; r_2 = (1-p_2)^{k/b_2} ;$ $c_1 = \sqrt{\frac{a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2-k/b_1}}{b_1 \cdot (r_0-r_1) + b_2 \cdot (r_1-\alpha_1 \cdot r_2) + b_3 \cdot \alpha_1 \cdot r_2}} ; v = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2}$ $a_0 = 4,851 \cdot 10^{-5} ; a_1 = 1,883 ; a_2 = 1,004 ; b_1 = 8,702 \cdot 10^{-6} ; b_2 = 3,302 \cdot 10^{-5} ; b_3 = 2,899 \cdot 10^{-5} ;$ $p_1 = 0,06526 ; p_2 = 0,6560$
	Tarifa de cubicación de rodal
	$V = (G \cdot H_0)^{0,9987-0,002232 \cdot t} \cdot \exp(-0,9635 + 0,01703 \cdot t)$

Tabla 4.4. Resumen de las funciones que constituyen el modelo de crecimiento para *Pinus sylvestris*.

Funciones de transición	Función de transición para la altura dominante
	$H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,277}}$
	Función de transición para el número de pies
	$N_2 = \left(N_1^{-1,590} + 1,138 \cdot 10^{-12} \cdot IS \cdot (t_2^{3,308} - t_1^{3,308})\right)^{-1/1,590}$
	Función de transición para el área basimétrica
	$G_2 = 92,40 \cdot \left(\frac{G_1}{92,40}\right)^{(t_1/t_2)^{1,369}}$
Funciones de salida	Función de inicialización del área basimétrica
	$G = 92,40 \cdot \exp\left(- (1,593/IS) \cdot t^{-1,369}\right)$
	Desagregación (diámetro medio aritmético)
	$\bar{d} = d_g - \exp(-1,294 + 0,0001867 \cdot N + 0,03625 \cdot H_0)$
	Función altura-diámetro generalizada
	$h = 1,3 + (H_0 - 1,3) \cdot \exp\left(7,197 \cdot \left(\frac{1}{d_0} - \frac{1}{d}\right)\right)$
Funciones de salida	Función de perfil del tronco y tarifa de cubicación de árbol individual
	$d_i = c_1 \cdot \sqrt{H^{(k-b_1)/b_1} \cdot (1-q)^{(k-\beta)/\beta} \cdot \alpha_1^{l_1+l_2} \cdot \alpha_2^{l_2}} ; k = \pi/40.000 ; q = h_i/h ;$
	$\begin{cases} l_1 = 1 \text{ si } p_1 \leq q \leq p_2 ; 0 \text{ en caso contrario} \\ l_2 = 1 \text{ si } p_2 < q \leq 1 ; 0 \text{ en caso contrario} \end{cases} ; \beta = b_1^{1-(l_1+l_2)} \cdot b_2^{l_1} \cdot b_3^{l_2} ; \alpha_1 = (1-p_1)^{\frac{(b_2-b_1)k}{b_1 \cdot b_2}} ;$
	$\alpha_2 = (1-p_2)^{\frac{(b_3-b_2)k}{b_2 \cdot b_3}} ; r_0 = (1-h_{st}/h)^{k/b_1} ; r_1 = (1-p_1)^{k/b_1} ; r_2 = (1-p_2)^{k/b_2} ;$
	$c_1 = \sqrt{\frac{a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2-k/b_1}}{b_1 \cdot (r_0-r_1) + b_2 \cdot (r_1-\alpha_1 \cdot r_2) + b_3 \cdot \alpha_1 \cdot r_2}} ; v = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2}$
	$a_0 = 6,421 \cdot 10^{-5} ; a_1 = 1,817 ; a_2 = 1,001 ; b_1 = 1,357 \cdot 10^{-5} ; b_2 = 3,059 \cdot 10^{-5} ; b_3 = 2,699 \cdot 10^{-5} ;$ $p_1 = 0,08199 ; p_2 = 0,6237$
	Tarifa de cubicación de rodal
	$V = 0,5908 \cdot G^{0,9981} \cdot H_0^{0,8844}$

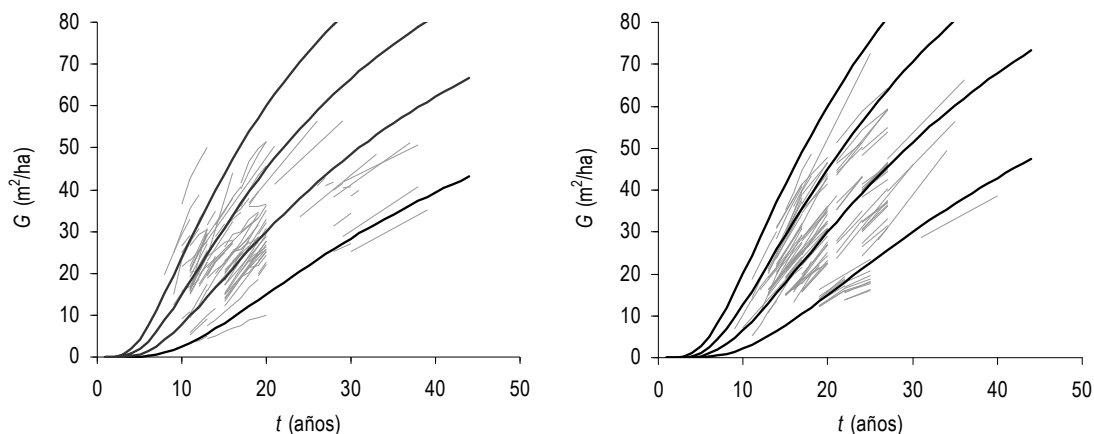


Figura 4.7. Curvas de evolución con el tiempo del área basimétrica para rodales de *Pinus pinaster* con áreas basimétricas de 15, 30, 45 y 60 m²/ha a los 20 años en la zona costera (izquierda) y en la zona interior (derecha).

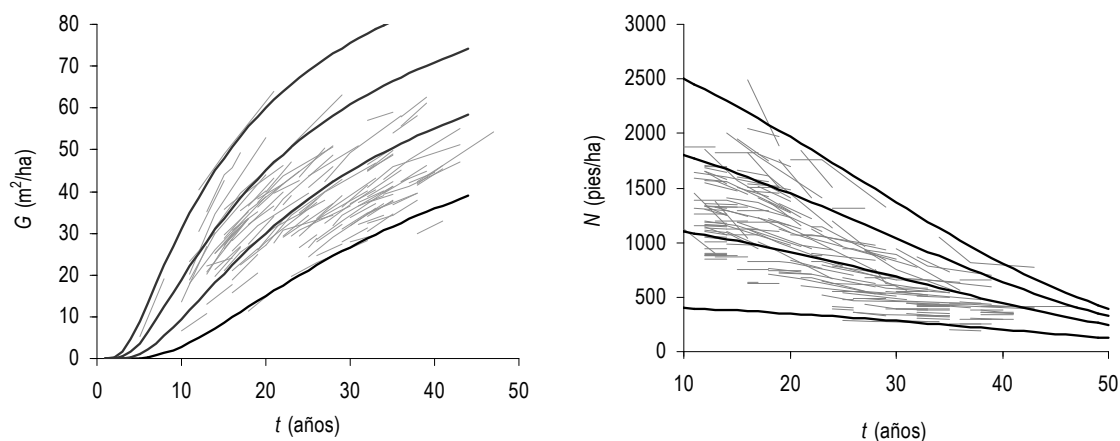


Figura 4.8. Curvas de evolución con el tiempo del área basimétrica para rodales de *Pinus radiata* con áreas basimétricas de 15, 30, 45 y 60 m²/ha a los 20 años (izquierda). Trayectorias de evolución con el tiempo del número de pies por hectárea para rodales de la especie con densidades de 400, 1.100, 1.800 y 2.500 pies/ha a los 10 años (derecha).

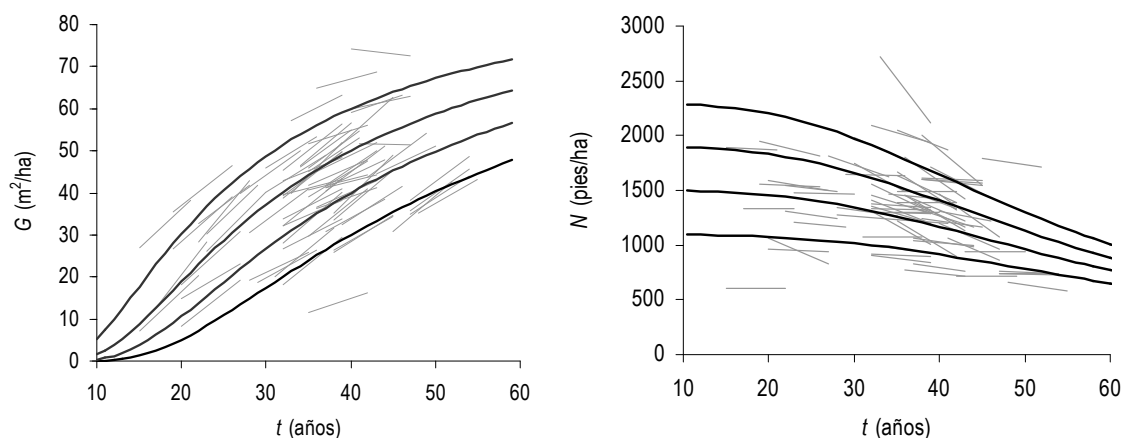


Figura 4.9. Curvas de evolución con el tiempo del área basimétrica para rodales de *Pinus sylvestris* con áreas basimétricas de 30, 40, 50 y 60 m²/ha a los 40 años (izquierda). Trayectorias de evolución con el tiempo del número de pies por hectárea para rodales de la especie con densidades de 1.100, 1.500, 1.900 y 2.300 pies/ha a los 10 años (derecha).

4.4. Conclusiones y recomendaciones

Los modelos dinámicos de crecimiento de rodal se consideran los más adecuados para la planificación de la gestión de rodales regulares (y por tanto de plantaciones forestales), como los que forman mayoritariamente las especies *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris* en Galicia. Los modelos presentados en este libro se basan en el uso de dos tipos de funciones: funciones de transición para la proyección en el tiempo de las variables de estado altura dominante, área basimétrica y número de pies por hectárea, y funciones de salida para la estimación en un instante dado de otras variables de interés como el volumen total o comercial, la biomasa total o por fracciones, etc.

Las funciones de transición de la altura dominante son una parte esencial de los modelos de crecimiento desarrollados, ya que la calidad de estación (dada por la altura dominante y la edad, o por el índice de sitio) interviene habitualmente en otras funciones de transición y en funciones de salida. Además, el índice de sitio es una variable fundamental para la caracterización del potencial de crecimiento asociado a un determinado rodal o área forestal. En esta función de transición se asume que la altura dominante del rodal permanece inalterada por los tratamientos selvícolas, dependiendo tan sólo de la edad correspondiente y del índice de sitio. Esta suposición es correcta si las claras se realizan por lo bajo o, al menos, si no afectan a los árboles dominantes (ver apartado 2.1.6 y anexo I).

Las funciones de transición del área basimétrica, para las tres especies consideradas, no incluyen ningún término específico que tenga en cuenta el efecto de las claras en el crecimiento posterior de dicha variable. Según se ha comprobado para *Pinus pinaster* (Barrio-Anta et al., 2006) y *Pinus radiata* (Castedo-Dorado et al., 2007b), el patrón de crecimiento del área basimétrica de un rodal tras una clara es muy similar al de otro que no haya sido clareado, por lo que no ha sido necesario incluir explícitamente ningún término de clara en la función de transición del área basimétrica. En este sentido, debe tenerse en cuenta que dichos modelos se han desarrollado a partir de datos provenientes de parcelas clareadas por lo bajo y de forma débil o moderada, por lo que es posible que para otros tipos de clara o elevados pesos de clara el patrón de crecimiento en área basimétrica sea distinto. Asimismo, sería recomendable la realización de mediciones repetidas del área basimétrica tras la clara en cortos intervalos de tiempo, para determinar el período en que se mantiene la respuesta del crecimiento de dicha variable debida al tratamiento selvícola.

La función de transición del número de pies por hectárea estima la disminución del número de árboles en el rodal debida a la competencia intraespecífica por agua, luz, nutrientes, etc. Aunque los modelos de mortalidad natural expuestos en las tablas 4.3 y 4.4 predicen una disminución del número de pies para todas las fases de desarrollo del rodal, a efectos prácticos parece razonable asumir que entre operaciones de clara tal disminución no existe (p. ej., Amateis et al., 1997). Sin embargo, esta suposición debe ser tomada con cautela, especialmente para largos períodos de tiempo entre claras. También es necesario advertir que es posible que las proyecciones medias

de mortalidad sobreestimen los valores reales, ya que las funciones de mortalidad están construidas con datos de rodales no intervenidos con claras desde varios años antes de realizarse el primer inventario de las parcelas.

Las funciones de salida permiten estimar otras variables de interés para la gestión práctica a partir de los valores de las variables de estado en un determinado instante. Las funciones de salida expuestas en este capítulo se han centrado en la estimación del volumen del rodal, si bien existen otras que pueden implementarse dentro de los modelos dinámicos propuestos, como las ecuaciones de estimación de biomasa (ver capítulo 10).

Las variables necesarias para la utilización del sistema de desagregación propuesto son fáciles de proyectar en el tiempo utilizando las funciones de transición para las variables de estado y otras funciones de salida. La única excepción la constituye el diámetro dominante d_0 , que requiere para su proyección futura el empleo de una función de distribución diamétrica.

Por otra parte, la metodología de desagregación permite modelizar fácilmente la influencia de las claras en la distribución diamétrica del rodal. Es decir, permite predecir, a partir de la distribución diamétrica antes de la clara y de las variables que definen el tipo de clara a realizar, cuál es la distribución diamétrica resultante después del tratamiento y, por diferencia entre ambas, qué tipos de productos se han extraído.

Las tarifas de cubicación de rodal que se presentan en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 son funciones de salida que permiten determinar el volumen del rodal de una forma rápida y sencilla, siendo sus estimaciones muy similares a las obtenidas con el sistema de desagregación (Castedo-Dorado et al., 2005). Sin embargo, estas tarifas no permiten estimar el volumen clasificado por clases de tamaño de los árboles, ni tampoco modelizar la influencia de las claras en la distribución de los pies por clases dimensionales.

A la hora de utilizar los modelos dinámicos de crecimiento aquí expuestos es necesario tener en cuenta una serie de limitaciones:

- ✓ Deben utilizarse con precaución en rodales jóvenes, de menos de unos 10 años en masas de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*, y de menos de 15 en masas de *Pinus sylvestris*. Ello es debido, por una parte, a que se han muestreado pocos rodales con edades inferiores a las indicadas y, por otra, a la gran variabilidad de las características dasométricas en ese tipo de rodales. Asimismo, las edades de 40, 45 y 55 años se consideran los límites superiores para la realización de simulaciones en rodales de *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris*, respectivamente, pues tampoco se han inventariado muchos rodales de edades superiores en cada especie. No obstante, el adecuado comportamiento de las funciones desarrolladas para *Pinus sylvestris* (tal y como ya se ha comentado) permite realizar una extrapolación de los resultados a edades relativamente próximas a la edad del turno estimado para la especie en Galicia (80-100 años).
- ✓ Por lo que se refiere a las variables de estado altura dominante, área basimétrica y número de pies por hectárea, y de acuerdo con los datos utilizados en la elaboración de

los modelos, se recomienda que para la edad inicial de la simulación oscilen entre los valores máximo y mínimo expuestos en la tabla 4.1 para cada especie.

- ✓ En cuanto a la evolución del número de pies por hectárea, no se somete a restricción en los modelos, de modo que puede plantearse cualquier situación posible eligiendo los marcos de plantación y regímenes de clara que interesen, siempre que la evolución propuesta esté representada en las parcelas empleadas para ajustar el modelo. Es decir, a cualquier edad se puede simular un clareo o una clara, fijar el número de pies o el área basimétrica a extraer, y comprobar los efectos de esta intervención sobre el resto de variables del rodal. En este sentido, el tipo de clara que se puede plantear debe ser por lo bajo, sistemática o semisistemática (clara sistemática por filas más clara por lo bajo entre las filas), y de peso débil o moderado, ya que son los tipos de clara que se encuentran representados en los datos experimentales utilizados. Los resultados obtenidos planteando claras con pesos muy fuertes deben tomarse con cautela, ya que para las especies estudiadas se desconoce el patrón de crecimiento del área basimétrica tras una clara de esas características.

Como se aprecia en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4, el conjunto de ecuaciones que describen los modelos de crecimiento dinámicos es complejo y difícil de utilizar en la práctica si no se dispone de una aplicación informática específica. Por ello, en el CD-ROM que acompaña a este libro se incluye la última versión del programa informático GesMO® 2009, en el que se han implementado las ecuaciones que constituyen los modelos de crecimiento y la lógica para relacionarlas de un modo coherente, de manera que sea posible una utilización sencilla de los mismos por parte de sus potenciales usuarios, que pueden generar tablas, gráficos e informes en función de sus necesidades. El simulador de crecimiento y producción de rodales forestales GesMO® 2009 permite, entonces, simular distintas alternativas selvícolas de gestión (densidades de plantación, tipo, peso y edad de las claras, y edad de la corta final) y analizar sus posibles consecuencias en términos de crecimiento, producción y rentabilidad económica, para lo cual incluye un manual de usuario que describe todas sus utilidades y el uso del programa.

4.5. Ejemplo de uso de los modelos dinámicos de crecimiento

Se presenta un ejemplo de utilización de los modelos dinámicos de crecimiento si no se dispusiera del simulador informático GesMO® 2009. Para simplificar la simulación se va a utilizar la tarifa de cubicación de rodal, en vez del sistema de desagregación, para estimar el volumen del rodal. Para resolver un ejemplo de estimación del volumen del rodal utilizando el sistema de desagregación se recomienda la lectura de los ejemplos de aplicación de cada una de las ecuaciones que lo constituyen: función de distribución diamétrica (capítulo 6), función altura-diámetro generalizada (capítulo 7) y tarifa de cubicación de árbol individual y/o función de perfil (capítulo 8).

Se va a suponer un rodal de *Pinus sylvestris* de 25 años de edad en el que se ha llevado a cabo un inventario consistente en la medición de una parcela representativa del mismo de 10 m de radio (314,16 m² de superficie). Las variables medidas en la parcela han sido el diámetro de todos los pies y una muestra de tres alturas correspondientes a los árboles dominantes (ver apartado 2.1.6 y anexo I). Los valores obtenidos para la altura dominante H_0 , el área basimétrica G y el número de pies por hectárea N han sido, respectivamente, 12 m, 16 m²/ha y 1.600 pies/ha.

Se pretende estimar el valor de estas variables y del volumen total de madera de la parcela a la edad de 55 años, suponiendo que a los 34 años se va a llevar a cabo una clara por lo bajo que supondrá una extracción del 30% del área basimétrica existente en ese momento.

Para resolver este ejemplo es necesario emplear las funciones de transición y las funciones de salida de la tabla 4.4, correspondientes al modelo dinámico de la especie *Pinus sylvestris*.

Como la clara origina un cambio instantáneo en el estado del rodal, es necesario estimar las trayectorias de las variables de estado comenzando en el punto del nuevo estado tras el tratamiento selvícola. Es decir, no es posible la realización de la simulación en un único paso, considerando como edades inicial y final de la simulación $t_1 = 25$ y $t_2 = 55$ años, respectivamente. Por el contrario, será necesario realizar la simulación en dos pasos: el primero hasta el momento anterior al de realización de la clara (es decir, considerando $t_1 = 25$ años y $t_2 = 34$ años) y el segundo desde el momento posterior al de realización de la clara hasta el final de la simulación (es decir, considerando en este caso $t_1 = 34$ años y $t_2 = 55$ años, pero tomando como valores iniciales los de después de la clara).

El primer paso es estimar el índice de sitio del rodal, ya que es una variable explicativa en la función de reducción del número de pies que se usa posteriormente. Para ello se utiliza la función de transición correspondiente a la altura dominante, también denominada ecuación de índice de sitio:

$$IS = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_{ref}}\right)^{1,277}} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{12}\right) \cdot \left(\frac{25}{40}\right)^{1,277}} = 18,3 \text{ m} \quad [4.1]$$

Para estimar la altura dominante, el área basimétrica y el número de pies por hectárea a la edad de realización de la clara, se utilizan las expresiones de las funciones de transición que se muestran en la tabla 4.4:

$$H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{H_{01}}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,277}} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{12}\right) \cdot \left(\frac{25}{34}\right)^{1,277}} = 16,0 \text{ m} \quad [4.2]$$

$$G_2 = 92,40 \cdot \left(\frac{G_1}{92,40}\right)^{\left(t_1/t_2\right)^{1,369}} = 92,40 \cdot \left(\frac{16}{92,40}\right)^{\left(25/34\right)^{1,369}} = 29,2 \text{ m}^2/\text{ha} \quad [4.3]$$

$$N_2 = \left(N_1^{-1,590} + 1,139 \cdot 10^{-12} \cdot IS \cdot (t_2^{3,308} - t_1^{3,308}) \right)^{-1/1,590} =$$

$$N_2 = \left(1.600^{-1,590} + 1,139 \cdot 10^{-12} \cdot 18,3 \cdot (34^{3,308} - 25^{3,308}) \right)^{-1/1,590} = 1.432 \text{ pies/ha} \quad [4.4]$$

La clara prevista en el rodal a la edad de 34 años implica un cambio instantáneo en las variables de estado número de pies por hectárea y área basimétrica, cambio que viene definido por el peso de la clara. En este ejemplo, al extraerse en la clara por lo bajo un 30% del área basimétrica existente en ese momento (29,2 m²/ha), su valor después de la intervención será de 20,4 m²/ha. Este valor es el que se utilizará, por tanto, como nuevo valor de partida (G_1) para estimar el crecimiento de esta variable hasta la edad de 55 años:

$$G_2 = 92,40 \cdot \left(\frac{G_1}{92,40} \right)^{(t_1/t_2)^{1,369}} = 92,40 \cdot \left(\frac{20,5}{92,40} \right)^{(34/55)^{1,369}} = 42,3 \text{ m}^2/\text{ha} \quad [4.5]$$

Se supone que la altura dominante del rodal no se ve afectada por la realización de una clara por lo bajo, en la que es asumible que no se extraen árboles del estrato dominante. Teniendo en cuenta esta consideración, así como la propiedad de invarianza con respecto al intervalo de proyección enunciada al comienzo de este capítulo, la estimación de la altura dominante para la edad de 55 años puede llevarse a cabo indistintamente considerando la edad inicial y final de la simulación o realizando la simulación en dos pasos, es decir:

$$H_{02} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{12} \right) \cdot \left(\frac{25}{55} \right)^{1,277}} = \frac{51,39}{1 - \left(1 - \frac{51,39}{18,3} \right) \cdot \left(\frac{34}{55} \right)^{1,277}} = 23,4 \text{ m} \quad [4.6]$$

Una vez proyectadas las variables de estado hasta la edad final de la simulación, se puede estimar el volumen de madera del rodal que se obtendrá en ese momento mediante una función de salida que, como se ha comentado al comienzo del ejemplo, se corresponde con una tarifa de cubicación de rodal:

$$V = 0,5908 \cdot G^{0,9981} \cdot H_0^{0,8844} = 0,5908 \cdot 42,3^{0,9981} \cdot 23,4^{0,8844} = 403 \text{ m}^3/\text{ha} \quad [4.7]$$

4.6. Bibliografía

- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Estudios FAO Montes 22/2, Roma.
- Amateis, R., Burkhart, H.E., Liu, J. 1997. Modeling survival in juvenile and mature loblolly pine plantations. For. Ecol. Manage. 90, 51–58.

- Bará, S., Toval, G. 1983. Calidad de estación del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia, Comunicaciones INIA, nº 24, Madrid.
- Barrio-Anta, M., Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G., Parresol, B.R., Rodríguez Soalleiro, R. 2006. Development of a basal area growth system for maritime pine in northwestern Spain using the generalized algebraic difference approach. *Can. J. For. Res.* 36(6), 1461-1474.
- Castedo-Dorado, F. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Simulación de alternativas selvícolas con inclusión del riesgo de incendio. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Rodríguez Soalleiro, R., Crecente-Campo, F. 2005. Comparación de dos alternativas de cubicación en masas regulares: tarifas de cubicación de masa vs. volumen desagregado por clases diamétricas. IV Congreso Forestal Español, Zaragoza, 26-30 de septiembre de 2005.
- Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G. 2007a. A growth model for *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. *Ann. For. Sci.* 64, 453–465.
- Castedo-Dorado, F.; Diéguez-Aranda, U.; Barrio-Anta, M.; Álvarez González, J.G. 2007b. Modelling stand basal area growth for radiata pine plantations in northwestern Spain using the GADA. *Ann. For. Sci.* 64, 609-619.
- Crecente-Campo, F. 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Diéguez-Aranda, U. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Diéguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F., Álvarez González, J.G., Rojo, A. 2006. Dynamic growth model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia (north-western Spain). *Ecological Modelling* 191(2), 225-242.
- Echeverría, I., De Pedro, S. 1948. El *Pinus pinaster* en Pontevedra: su productividad normal y aplicación a la celulosa industrial. *Boletín IFIE* 38. Madrid.
- Gadow, K.v. 1996. Modelling growth in managed forests – realism and limits of lumping. *Sci. Total Environ.* 183, 167–177.
- Gadow, K.v., Rojo, A., Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R. 1999. Ensayos de crecimiento. Parcelas permanentes, temporales y de intervalo. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For. Fuera de Serie* nº 1, 299-310.
- García, O. 1988. Growth modelling – a (re)view. *N. Z. For.* 33(3), 14-17.
- García, O. 1994. The state-space approach in growth modelling. *Can. J. For. Res.* 24, 1894-1903.
- García, O. 2003. Dimensionality reduction in growth models: an example. *Forest Biometry, Modelling and Information Sciences* 1, 1–15.
- Hyink, D.M. 1980. Diameter distribution approaches to growth and yield modeling. En: Brown, K.M., Clarke, F.R. (Eds.). *Forecasting Forest Stand Dynamics*. School of Forestry, Lakehead University, pp. 138-163.
- Knoebel, B.R., Burkhardt, H.E., Beck, D.E. 1986. A growth and yield model for thinned stands of Yellow-Poplar. *For. Sci. Monograph* 27.
- Maltamo, M., Puumalainen, J., Päivinen, R. 1995. Comparison of beta and Weibull functions for modelling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand. J. For. Res.* 10, 284-295.

- Philip, M.S. 1994. Measuring trees and forests. 2nd Edition. CAB International, Wallingford.
- Pienaar, L.V., Turnbull, K.J. 1973. The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. For. Sci. 19(1), 2-22.
- Rodríguez Soalleiro, R., Madrigal, A. 2008. Selvicultura de *Pinus pinaster* Ait. subsp. *atlantica* H. de Vill. En: Serrada, R., Montero, G., Reque, J.A. (Eds.). Compendio de selvicultura aplicada en España. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid, pp. 367-398.
- Vega Alonso, P., Vega Alonso, G., González Rosales, M., Rodríguez San José, A. 1993. Mejora del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. I Congreso Forestal Español, 14–18 de junio de 1993, Lourizán, Pontevedra. pp. 129–134. Tomo II.

5. Modelos de crecimiento de árbol individual

5.1. Introducción

Ya se ha comentado en el capítulo 1 que una de las clasificaciones de los modelos forestales de crecimiento distingue, según la unidad de predicción, entre modelos de rodal, modelos de clases dimensionales y modelos de árbol individual. Los modelos de rodal utilizan como variables de partida variables dasométricas (p. ej., número de pies por hectárea, área basimétrica, índice de sitio, edad), mientras que en los modelos de árbol por lo menos una de las variables de entrada es de árbol individual (p. ej., diámetro normal, altura total, variables de copa, etc.). Como ya se ha indicado, los modelos de árbol individual son los más complejos y de mayor detalle, y modelizan individualmente el estado futuro para cada árbol de una muestra.

El crecimiento de un árbol es un proceso mucho más complejo que el mero incremento de su volumen. Mediante un proceso de diferenciación se van formando una gran variedad de nuevas células, tejidos y órganos que permiten al árbol adaptarse a los cambios que se producen en el ambiente que le rodea, y esta capacidad de adaptación causa modificaciones en la pauta de crecimiento (Mitscherlich, 1971, 1975; Raven et al., 1986). Todavía no se conocen bien los mecanismos que regulan los procesos de adaptación, aunque se acepta universalmente que uno de los factores que más afecta al crecimiento de un árbol es la interacción espacial con otros árboles y la competencia por los recursos que de ella se deriva (Gadow et al., 2001). Esta competencia se cuantifica mediante los denominados índices de competencia (Biging y Dobbertin, 1992), que son, junto con otras, una de las variables indispensables en la construcción de un modelo de árbol individual (Gadow y Hui, 1999; Schröder, 2000). Estos índices se utilizan para determinar si el árbol morirá por competencia natural y, en caso contrario, para estimar el crecimiento de su diámetro, de su altura y, en ocasiones, de las dimensiones de su copa.

Existen numerosas metodologías para calcular los índices de competencia, que dan lugar, a su vez, a una clasificación de los modelos de árbol individual. Así, si en su cuantificación se tienen en cuenta las distancias que separan un árbol de sus inmediatos competidores, el modelo se clasifica como dependiente de la distancia; si, por el contrario, no se tienen en cuenta dichas distancias, el modelo se clasifica como independiente de la distancia (Davis et al., 2001).

Los primeros modelos de crecimiento de árbol individual fueron desarrollados en América del Norte (p. ej., Newnham, 1964; Stage, 1973; Monserud, 1975; Wykoff et al., 1982). Posteriormente, a principios de los años 90 del siglo pasado, se desarrollaron modelos de estas características en la Península escandinava y en Europa central. Ejemplos de modelos de árbol individual contruidos en Europa son los trabajos de Sterba (1983), Pukkala (1988, 1989), Pretzsch (1992, 2001) y Pretzsch et al. (2002). En España, cabe citar como uno de los primeros modelos de árbol

individual el desarrollado por Martínez Millán y Madrigal (1982) para *Eucalyptus camaldulensis* en la provincia de Huelva, y recientemente se han publicado numerosos modelos de este tipo (Palahí et al., 2003; Trasobares et al., 2004a, 2004b; Calama y Montero, 2005; Sánchez-González et al., 2006; Crecente-Campo, 2008).

Hasta la fecha sólo se ha desarrollado un modelo de crecimiento de árbol individual específico para Galicia (Crecente-Campo, 2008), concretamente para las plantaciones de *Pinus radiata*. En este capítulo se resumen los métodos utilizados y los resultados obtenidos en la elaboración de este modelo de crecimiento de árbol individual.

5.1.1. Estructura de los modelos de crecimiento de árbol individual

Los componentes básicos que normalmente constituyen un modelo de crecimiento de árbol individual son las ecuaciones que permiten estimar la mortalidad, el reclutamiento (o incorporación de nuevos individuos) y el crecimiento en diámetro o sección normal (Vanclay, 1994). A las ecuaciones ya nombradas se puede añadir una más de crecimiento en altura, con el fin de predecir el crecimiento en volumen con mayor exactitud a partir de los valores futuros de diámetro y altura, aunque una alternativa bastante frecuente es el empleo de una relación altura-diámetro generalizada, que permite estimar la altura futura a partir de la estimación del diámetro y de variables de rodal (ver capítulo 7). La figura 5.1 muestra el esquema general de un modelo de crecimiento de árbol individual (el significado de los símbolos puede consultarse en el capítulo 4).

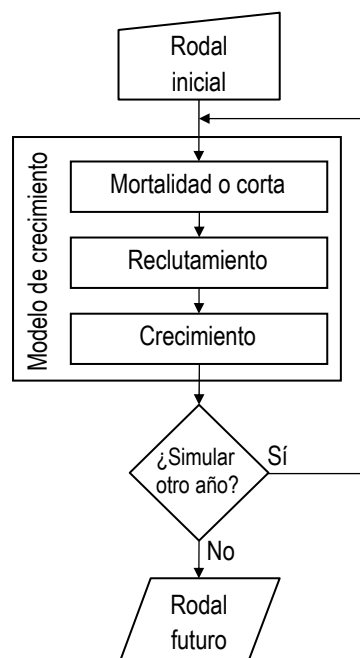


Figura 5.1. Estructura de un modelo de crecimiento de árbol individual.

El modelo de crecimiento parte de la situación actual conocida del rodal, definida por un listado de datos de árboles que incluye diámetros, alturas y, dependiendo del tipo de modelo, variables de copa y distancias entre pies. A partir de ese listado se determina el valor del índice de

competencia de cada árbol y, posteriormente, se emplean las ecuaciones que estiman la mortalidad y el reclutamiento para determinar el nuevo listado de árboles para el período siguiente (algunos modelos realizan simulaciones con períodos de tiempo superiores a un año, pero lo más frecuente es una predicción anual). Una vez determinado el nuevo listado de árboles se estima para cada uno de ellos el crecimiento en diámetro y en altura y, en caso de ser necesario, el crecimiento de las variables de copa y las nuevas distancias entre pies resultantes de las incorporaciones y las pérdidas por mortalidad (en algunos modelos el crecimiento en altura no se estima, sino que, como ya se ha comentado, la nueva altura se obtiene de una relación altura-diámetro generalizada). A continuación se describen brevemente cada una de esas ecuaciones que forman parte de un modelo de árbol individual.

Ecuación de mortalidad

Los modelos de árbol predicen la mortalidad para cada individuo a partir de variables del propio árbol, de índices de competencia y de variables relacionadas con la estación forestal. La metodología empleada para ajustar la ecuación de mortalidad difiere de la habitual de regresión por el método mínimos cuadrados que se ha empleado para muchas de las ecuaciones que se presentan en este libro, al ser binaria la variable dependiente (el árbol puede morir o no durante un determinado período, es decir, las respuestas posibles son 0 ó 1). En estos casos se suele emplear regresión logística, y el resultado de utilizar la ecuación logística ajustada es un valor entre 0 y 1. Por lo tanto, es necesario seleccionar un valor de corte para decidir si el árbol sobrevivirá o no al próximo período de crecimiento, de tal manera que si el valor estimado con la ecuación logística es mayor que el valor de corte el resultado del modelo se asigna a 1, y se considera que el árbol sobrevive al próximo período de crecimiento.

Ecuación de reclutamiento

El número de pies por hectárea puede variar no sólo por mortalidad, sino también por la incorporación de nuevos árboles (o reclutamiento) como consecuencia de la regeneración natural o del crecimiento de árboles jóvenes que, inicialmente, no alcanzaban la altura de 1,30 m o no tenían el diámetro mínimo inventariable, por lo que no eran considerados en las mediciones diamétricas. Las metodologías más recientes de desarrollo de modelos han dividido el reclutamiento de árboles jóvenes en dos fases: por una parte el establecimiento del regenerado (Pukkala y Kolström, 1992; Ribbens et al., 1994; Schweiger y Sterba, 1997) y por otra el crecimiento de los árboles jóvenes (Monserud y Ek, 1977; Golser y Hasenauer, 1997; Biber y Herling, 2002).

En las plantaciones, el reclutamiento suele ser reducido, e incluso nulo en muchas ocasiones, por lo que los modelos de árbol individual para este tipo de rodales generalmente no requieren de una ecuación de reclutamiento o incorporación de nuevos individuos.

Ecuaciones de crecimiento en diámetro y altura

Por último, en cuanto a las ecuaciones para predecir el crecimiento en diámetro (o en sección normal) y en altura de los árboles de un rodal, habitualmente se han utilizado dos metodologías diferentes: modelos dependientes e independientes del crecimiento potencial (Hasenauer, 2006).

Los modelos dependientes del crecimiento potencial fueron propuestos por primera vez por Newnham (1964), y asumen la existencia de un límite superior que marca el máximo crecimiento posible para la especie y la estación, al que se denomina crecimiento potencial. Los modelos basados en este concepto deben definir en primer lugar los crecimientos potenciales en diámetro y altura i_p . Una vez establecidos estos valores, el crecimiento de cada árbol se obtiene al multiplicar el crecimiento potencial por un factor corrector k que tiene en cuenta su situación de competencia (Hasenauer, 2006). La formulación general de este tipo de modelos puede ser:

$$i = i_p \cdot k, \text{ siendo } k = f(X_{\text{árbol}}, IC) \quad [5.1]$$

donde i es el crecimiento de cada árbol, i_p el crecimiento potencial predefinido para la especie y la estación forestal, k es el coeficiente corrector, $X_{\text{árbol}}$ es una o un conjunto de variables del árbol que pueden formar parte del modelo e IC es un índice de competencia. En estos modelos, es imprescindible definir de forma realista el crecimiento potencial que marca el límite superior o máximo crecimiento que el modelo puede predecir. Ejemplos de simuladores informáticos y modelos de crecimiento que utilizan este concepto son SILVA (Pretzsch, 1992; Pretzsch et al., 2002), MOSES (Hasenauer, 1994) y B-WIN (Nagel, 1995).

La segunda metodología normalmente utilizada en los modelos de árbol no define un límite superior o crecimiento potencial, sino que el crecimiento se estima directamente a partir de variables que definen el estado actual del árbol y de la estación forestal en la que se asienta. La formulación general de este tipo de modelos puede ser:

$$i = f(X_{\text{árbol}}, IC, X_{\text{estación}}) \quad [5.2]$$

donde i es el crecimiento de cada árbol, $X_{\text{árbol}}$ es una o un conjunto de variables que definen el estado del árbol, IC es un índice de competencia y $X_{\text{estación}}$ es una o un conjunto de variables que definen la estación forestal. Ejemplos de simuladores informáticos y modelos que utilizan esta metodología son PROGNOISIS (Stage, 1973; Wykoff, 1990) y PROGNAUS (Sterba et al., 1995).

5.2. Material y métodos

5.2.1. Datos

Ya se ha comentado que en este capítulo se presenta el único modelo de crecimiento de árbol individual desarrollado específicamente para Galicia hasta el momento, concretamente para

Pinus radiata (Crecente-Campo, 2008). Los datos utilizados proceden de la red de parcelas permanentes que mantiene el grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela, en plantaciones de la especie en Galicia (Castedo-Dorado, 2004; Castedo-Dorado et al., 2007; Crecente-Campo, 2008), y que se ha descrito en el capítulo 1. De las 223 parcelas que comenzaron a instalarse y medirse en el invierno de 1995-96, se remidieron 155 en 1998-99, y posteriormente 56 de éstas en 2004-05. En ese tercer inventario se midieron además las coordenadas relativas de todos los árboles en 44 parcelas, mediante una estación total topográfica. De esta manera se dispuso de información espacial para el cálculo de índices de competencia dependientes de la distancia entre pies. En estas parcelas también se midió la altura de la base de la copa viva (h_{blc} , m, definida como la altura desde el suelo a la que se encuentra la inserción en el tronco del primer verticilo que contiene acículas vivas y forma parte de la copa como un conjunto) y dos diámetros perpendiculares de la copa, medidos siempre según las direcciones de los lados de las parcelas, que se corresponden con el diámetro máximo de la copa (l_{cd} , m), todo ello en los 30 árboles elegidos aleatoriamente en cada parcela en los que se había medido la altura en los inventarios anteriores. Se dispuso, de esta forma, de información para el cálculo de ecuaciones de predicción de dichas variables.

En cada una de las 56 parcelas medidas en el tercer inventario se trató de seleccionar ocho árboles para la medición de su perfil de copa, de modo que quedasen representadas por igual todas las clases sociológicas existentes: árboles dominantes, codominantes, intermedios y sumergidos. En total se seleccionaron 443 árboles, en cada uno de los cuales se midió la altura total (h , m), la altura de la base de la copa viva (h_{blc} , m) y dos diámetros perpendiculares de copa (l_{cd} , m). Para la medición del perfil de copa de cada árbol se empleó un aparato similar al utilizado por Hussein et al. (2000), formado por una pieza de metacrilato transparente de 25 x 40 cm unida a un jalón para clavarlo en el terreno y mantenerlo fijo durante las mediciones. Sobre el metacrilato se superpuso una transparencia dividida en cuadrados de igual tamaño, que servían como referencias para efectuar las mediciones (figura 5.2). Una vez que el operario se situaba a una distancia adecuada del árbol desde la que era posible encajar toda la copa del árbol en la transparencia, el jalón se clavaba en el suelo de manera que permaneciese paralelo al eje del árbol, para asegurar la consistencia angular. Manteniendo fijo el punto de observación, se dibujaban los puntos característicos del perfil exterior de la copa del árbol sobre la transparencia: ápice del árbol, inserción en el tronco del primer verticilo que contenía acículas vivas, puntos donde se encontraban esas primeras acículas vivas y puntos significativos del borde exterior de la copa del árbol.

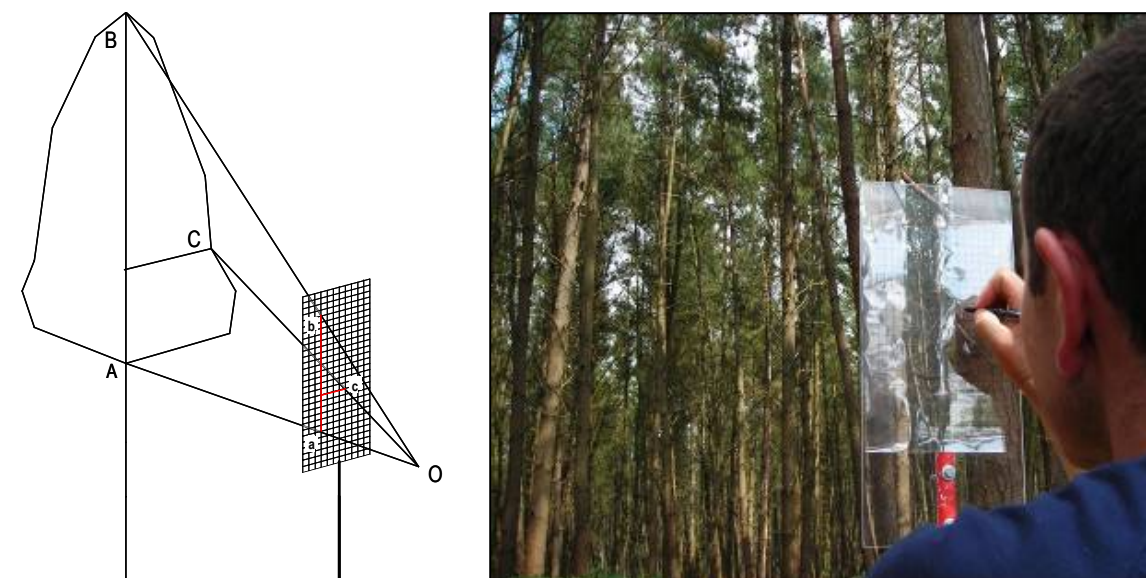


Figura 5.2. Esquema de utilización del aparato utilizado para la determinación del perfil de la copa y de sus variables características.

En la tabla 5.1 se muestran los valores de las variables de árbol y de rodal más importantes de la base de datos utilizada en este trabajo.

Tabla 5.1. Estadísticos descriptivos de la muestra empleada para elaborar el modelo de árbol individual (la tabla muestra valores para el conjunto de los tres inventarios para las parcelas utilizadas: 130 medidas en los inventarios 1 y 2, y 51 remedidas en el inventario 3).

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
d	21,2	5,1	72,9	10,3
N	879	200	2491	464
G	35,6	6,6	64,0	10,9
d_g	25,3	8,7	50,9	8,8
H_0	21,8	7,8	35,2	5,9
t	24,9	10,0	47,0	8,3
IS	19,6	11,3	27,6	3,3

Nota: d = diámetro normal con corteza (cm, 1,3 m sobre el nivel del suelo); N = número de pies por hectárea (pies/ha); G = área basimétrica (m^2 /ha); d_g = diámetro medio cuadrático (cm); H_0 = altura dominante (m); t = edad (años); IS = índice de sitio, definido como la altura dominante (m) del rodal a los 20 años, y determinado mediante la ecuación de calidad de estación desarrollada para *Pinus radiata* en Galicia por Diéguez-Aranda et al. (2005, ver capítulo 2).

5.2.2. Metodología

De una forma sintética, en el modelo elaborado se ha partido de la situación de un rodal en un instante determinando, definida por un listado de árboles con las variables individuales diámetro normal (d), altura total (h) y edad (t). A partir de dicho listado puede determinarse el número de pies por hectárea (N), el área basimétrica (G , obtenida por agregación de las secciones normales

de los árboles individuales) y la altura dominante (H_0 , obtenida como promedio de la altura de los 100 pies más gruesos por hectárea, ver apartado 2.1.6 y anexo I). Esa situación inicial del rodal ha servido de base para comenzar el siguiente proceso de simulación, que se aplica a cada uno de los árboles:

1. Se calculan todos los índices de competencia y todas las variables que requieren los modelos de crecimiento y mortalidad.
2. Se compara la probabilidad de supervivencia predicha para cada árbol por la ecuación de mortalidad con un valor de corte previamente definido. Si esta probabilidad es superior al valor de corte, el árbol sobrevive a un período anual de crecimiento; en caso contrario se considera que la competencia hace que el árbol muera por falta de recursos (luz, agua y/o nutrientes).
3. Se estima el diámetro futuro de los árboles que sobreviven al período de crecimiento, empleando la ecuación de crecimiento en diámetro. También se estima la altura futura, bien con una ecuación de crecimiento propia o bien empleando una relación altura-diámetro generalizada.
4. Se obtiene la nueva situación del rodal un año después. Si se desea proyectar más años se vuelve al punto 1.
5. Si a una edad determinada se quiere simular una clara, entonces se eliminan los árboles a extraer del listado de árboles y se vuelve a proyectar hacia el futuro a partir del punto 1.

El esquema descrito es similar al de la figura 5.1, con la única diferencia de que en el modelo desarrollado para *Pinus radiata* en Galicia no se ha incluido una ecuación de reclutamiento o incorporación de nuevos pies, puesto que en los rodales objeto de estudio, y en general en todas las plantaciones de esta especie en Galicia, no aparece una regeneración apreciable.

Se considera que la altura dominante del rodal permanece inalterada por los tratamientos selvícolas, que no suelen afectar al estrato dominante, por lo que depende tan sólo de la edad del rodal y de la calidad de la estación, definida por el índice de sitio utilizando la ecuación de calidad de estación desarrollada por Diéguez-Aranda et al. (2005).

La evolución del número de pies no se ha sometido a restricción en el modelo, de modo que puede plantearse cualquier situación posible eligiendo los marcos de plantación y regímenes de clara que interesen, siempre que la evolución propuesta esté representada en las parcelas empleadas para ajustar el modelo. A estos efectos, se presentan en la tabla 5.2 los rangos de número de pies por hectárea y área basimétrica inicial por clases de edad empleados en el ajuste del modelo.

Tabla 5.2. Rangos de número de pies por hectárea N y área basimétrica inicial G por clases de edad empleados en el ajuste de las ecuaciones que forman parte del modelo de crecimiento de árbol individual.

Clase de edad (años)	N (pies/ha)	G (m ² /ha)
10 – 14	870 – 2.032	6,6 – 41,0
15 – 19	630 – 2.491	11,4 – 49,9
20 – 24	533 – 1.888	19,8 – 51,0
25 – 29	280 – 1.000	24,5 – 46,3
30 – 34	290 – 1.080	27,9 – 57,1
35 – 39	200 – 827	29,9 – 63,1
40 – 44	378 – 420	46,8 – 49,8

Los modelos utilizados para estimar el crecimiento son una forma especial de diversas ecuaciones dependientes del crecimiento potencial propuestas por Zeide (1993), en las que el crecimiento se divide en dos componentes: uno representa la tendencia intrínseca hacia un crecimiento ilimitado (componente de expansión) y el otro las restricciones al mismo (componente de disminución):

$$i_z = a \cdot z^b \cdot \exp(X_{\text{árbol}}, IC, \dots) \quad [5.3]$$

donde z es la variable cuyo crecimiento i_z se quiere modelizar, $X_{\text{árbol}}$ es una o un conjunto de variables que definen el estado del árbol, IC es un índice de competencia, y a y b son los parámetros a estimar. En esta ecuación, el componente de expansión es una función potencial del tamaño, mientras que el componente de disminución es una función exponencial de variables del árbol y de la competencia. Zeide (1993) examinó diferentes alternativas y concluyó que las ecuaciones de este tipo eran las que mejor describían el crecimiento en diámetro, altura y volumen.

Para estimar la mortalidad anual se ha ajustado una función de respuesta binaria, en este caso la función logística, si bien se podría haber utilizado cualquier función de distribución acumulativa que predijese valores entre 0 y 1. Debido a que el intervalo de tiempo entre las mediciones efectuadas en las distintas parcelas no ha sido el mismo (tres años entre los inventarios primero y segundo, y seis años entre el segundo y el tercero), se ha empleado una metodología especial propuesta por Flewelling y Monserud (2002) para obtener predicciones de mortalidad anual.

Por otra parte, se ha realizado una comparación gráfica y numérica de las proyecciones hechas para los años entre inventarios, utilizando las 130 y las 51 parcelas que fueron remedidas en los inventarios segundo y tercero, respectivamente, y que no habían sido sometidas a tratamientos selvícolas en el período entre inventarios. Para llevar a cabo la comparación numérica se ha utilizado el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), cuyas expresiones y significado se pueden consultar en el anexo II.

La bondad de las estimaciones realizadas también se ha determinado mediante la comparación entre la distribución diamétrica predicha y la distribución diamétrica observada. Para

ello se ha utilizado el test de Kolmogorov-Smirnov, que está basado en la comparación entre la función de distribución predicha por el modelo que se propone y las frecuencias acumuladas de los datos muestrales.

Finalmente se ha calculado el error crítico (expresado como un porcentaje de la media observada), a partir del estadístico de Freese (1960) para las estimaciones del número de pies por hectárea y del área basimétrica.

5.3. Resultados

Las expresiones de los modelos de incremento anual en sección normal y altura finalmente seleccionados son:

$$i_g = 0,2822 \cdot d^{2,845} \cdot G^{-0,8608} \cdot \exp(-0,05018 \cdot t - 0,04285 \cdot BALMOD - 1,471 \cdot BAR) \quad [5.4]$$

$$i_h = 0,05287 \cdot h^{-0,5733} \cdot d^{0,5437} \cdot IS^{1,084} \cdot \exp(-0,03242 \cdot t - 50,87 \cdot R_{BA-D}) \quad [5.5]$$

donde:

i_g = crecimiento anual en sección normal del árbol (cm²).

d = diámetro normal con corteza del árbol (cm).

G = área basimétrica del rodal (m²/ha).

t = edad del rodal (años).

$BALMOD = BAL/(G \cdot IH)$, índice de competencia desarrollado por Schröder y Gadow (1999),

donde $BAL = \frac{\pi \cdot 10.000}{4 \cdot s} \cdot \sum d_{mi}^2$, siendo IH el índice de Hart-Becking en tanto por uno

asumiendo una distribución de los árboles a marco real (ver apartado 3.3.3 y anexo I), H_0 = altura dominante (m, ver apartado 2.1.6 y anexo I), N = número de pies por hectárea, s = superficie de la parcela (m²), d_{mi} = diámetro normal (cm) de los árboles más gruesos que el árbol i .

$BAR = 100 \cdot g/G$, ratio, en porcentaje, entre la sección normal del árbol g (m²) y el área basimétrica del rodal G (m²/ha).

i_h = crecimiento anual en altura del árbol (m).

h = altura total del árbol (m).

IS = índice de sitio, definido como la altura dominante (m) del rodal a los 20 años (ver ecuación de calidad de estación para la especie en la tabla 2.2).

$R_{BA-D} = (g/G)^{(d/d_g)}$, ratio entre la sección normal del árbol g (m²) y el área basimétrica del rodal G (m²/ha) elevado al cociente entre el diámetro normal del árbol d (cm) y el diámetro medio cuadrático del rodal d_g (cm).

Todas las estimaciones de los parámetros han resultado significativas a un nivel del 5%. Estos modelos presentan una distribución adecuada de los residuos, así como un correcto significado biológico de los parámetros. Además, explican más de la mitad y más de un tercio de la variabilidad en el crecimiento anual en sección normal y altura, respectivamente.

Como se puede apreciar, los índices de competencia elegidos para formar parte de los modelos de crecimiento en sección normal y altura son independientes de la distancia entre los pies del rodal y de las variables de la copa mencionadas, y con ellos se han obtenido resultados muy similares a los que han proporcionado los mejores índices dependientes de la distancia. Esto supone una gran ventaja de orden práctico a la hora de utilizar el modelo, ya que no es necesario medir las coordenadas de los árboles ni variables de su copa.

La ecuación logística seleccionada para estimar la probabilidad de supervivencia anual de cada árbol ha sido:

$$P_s = \frac{1}{1 + \exp\left(-2,085 - 3,228 \cdot \frac{d}{d_g} - 0,001056 \cdot d^2 + 0,03692 \cdot G - 0,07922 \cdot H_0 + 0,3048 \cdot BALMOD\right)} \quad [5.6]$$

donde P_s es la probabilidad de supervivencia anual (tanto por uno) y el resto de variables ya se han definido anteriormente.

Para la utilización de este modelo es necesaria la selección de un valor de corte de comparación, de forma que si el valor proporcionado por la ecuación [5.6] para un árbol es superior a ese valor de corte se asume que dicho árbol sobrevive al próximo período de crecimiento. Este valor de corte (que se indica más adelante) se ha elegido de forma que las estimaciones de área basimétrica y número de pies por hectárea, así como la distribución diamétrica, sean lo más parecidas a la situación observada en las parcelas de muestreo.

Así, para cada una de las 130 parcelas medidas en los inventarios primero y segundo, y las 51 parcelas medidas en los inventarios segundo y tercero, se han calculado los valores predichos por el modelo de crecimiento de árbol individual a la edad del segundo y tercer inventarios para las variables diámetro normal d , altura total h , área basimétrica G y número de pies por hectárea N , utilizando como variables de partida las obtenidas a partir de las mediciones de los inventarios primero y segundo, respectivamente. Para ello se ha proyectado (como se explica en el apartado 5.2.2.) el crecimiento en sección normal y altura de los pies que sobreviven al período de crecimiento. Esta proyección se ha hecho año a año, que es la forma de funcionamiento del modelo desarrollado. Una vez que se ha estimado qué árboles sobreviven al próximo período de crecimiento anual (mediante la ecuación de mortalidad), se ha proyectado su crecimiento anual en sección normal y en altura, y se han calculado las nuevas variables (de rodal y de competencia) que forman parte de los modelos y que son necesarias para proyectar al siguiente año. Este proceso se ha repetido para tres años en el caso de las parcelas medidas entre los inventarios primero y segundo, y para seis años en el caso de las parcelas medidas entre los inventarios segundo y tercero. En lugar de utilizar un valor de corte fijo para decidir qué árboles sobreviven y

cuáles no al próximo período de crecimiento, se han realizado las simulaciones para todos los valores de corte entre 0 y 1, con el fin de obtener el valor más adecuado, ya que el funcionamiento de la ecuación de mortalidad por sí sola no tiene por qué ser el mismo que al combinarla con los modelos de crecimiento.

Utilizando un valor de corte de 0,85, el modelo de crecimiento de árbol individual ha presentado coeficientes de determinación (R^2) de 0,963 y 0,948 en la estimación del número de pies por hectárea y del área basimétrica, con errores medios (REMC) de 89,3 pies/ha y 2,46 m²/ha, respectivamente. Con respecto a la estimación del diámetro y la altura, la comparación de los valores reales con los predichos por el modelo ha dado lugar a coeficientes de determinación (R^2) de 0,982 y 0,957, con errores medios (REMC) de 1,32 cm y 1,29 m, respectivamente (en el anexo II puede consultarse la expresión y el significado de estos dos estadísticos de bondad del ajuste). Otra prueba más de la fiabilidad del modelo ha sido el hecho de que más del 86% de las parcelas han superado el test de Kolmogorov-Smirnov para la función de distribución diamétrica, utilizando una probabilidad asociada de 0,05.

El sesgo de las estimaciones de área basimétrica y número de pies por hectárea, al utilizar un valor de corte de 0,85, ha sido de -0,60 m²/ha y -28 pies/ha, lo que representa un 1,53% y un 3,35%, respectivamente, en relación a los correspondientes valores medios de las variables.

Por otra parte, el valor del error crítico calculado para el modelo de árbol individual ha sido del 10,8% para las estimaciones de área basimétrica y del 18,0% para las del número de pies por hectárea, cuando se ha utilizado ese mencionado valor de corte de 0,85. Estos errores no superan en ningún caso el 20%, límite máximo que se suele considerar para rechazar un modelo en el campo forestal (Huang et al., 2003).

5.4. Conclusiones y recomendaciones

- ✓ Aunque los modelos dinámicos de crecimiento de rodal presentan resultados muy buenos en plantaciones, los modelos de árbol individual pueden ser una alternativa interesante, fundamentalmente en la estimación de la distribución diamétrica y, al menos, para períodos de proyección cortos.
- ✓ Sería conveniente disponer de datos de crecimiento de períodos más amplios para poder realizar proyecciones a largo plazo y acotar con mayor precisión el uso del modelo (intervalo máximo de proyección).
- ✓ A pesar de que el rango de datos utilizado en la elaboración del modelo de árbol individual de *Pinus radiata* está dentro del turno normalmente utilizado para la especie en Galicia, no existen muchos datos a edades avanzadas, sobre todo en rodales de buenas calidades. Las extrapolaciones fuera del rango de datos utilizados deben tomarse con cautela.

- ✓ Deberían realizarse nuevos inventarios, preferiblemente en rodales independientes, para validar el modelo y reajustarlo, de ser necesario, con el paso del tiempo.
- ✓ La respuesta del modelo a una clara se debe a la reducción de la densidad que se produce. Es interesante continuar con los ensayos de clara de distinto tipo y peso para estudiar su efecto en el crecimiento y la mortalidad de esta especie, y para evaluar la necesidad de incluir o no dicho efecto en los modelos, mediante otro procedimiento.

5.5. Bibliografía

- Biber, P., Herling, H. 2002. Modellierung der Verjüngungsdynamik als Bestandteil von einzelbaumorientierten Waldwachstumsmodellen. Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde des DVFFA, Jahrestagung 2002, 13-15 Mai, Schwarzburg, pp. 194–216.
- Biging, G.S., Dobbertin, M. 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *For. Sci.* 38 (3), 695–720.
- Calama, R., Montero, G. 2005. Multilevel linear mixed model for tree diameter increment in stone pine (*Pinus pinea*): a calibrating approach. *Silva Fenn.* 39(1), 37–54.
- Castedo-Dorado, F. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Simulación de alternativas selvícolas con inclusión del riesgo de incendio. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G. 2007. A growth model for *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. *Ann. For. Sci.* 64, 453–465.
- Crecente-Campo, F. 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Davis, L.S., Johnson, K.N., Bettinger, P.S., Howard, T.E. 2001. Forest management: to sustain ecological, economic and social values. McGraw-Hill Series in Forest Resources, New York.
- Diéguez-Aranda, U., Burkhardt, H.E., Rodríguez Soalleiro, R. 2005. Modeling dominant height growth of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in north-western Spain. *For. Ecol. Manage.* 215, 271–284.
- Flewelling, J.W., Monserud, R.A. 2002. Comparing methods for modelling tree mortality. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-25*, 168–177.
- Freese, F. 1960. Testing accuracy. *For. Sci.* 6(2), 139–145.
- Gadow, K.v., Hui, G. 1999. *Modelling Forest Development*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Gadow, K.v., Real, P., Álvarez González, J.G. 2001. Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. IUFRO World Series vol. 12, Viena.
- Golser, M., Hasenauer, H. 1997. Predicting juvenile tree height growth in uneven-aged mixed species stands in Austria. *For. Ecol. Manage.* 97, 133–146.
- Hasenauer, H. 1994. Ein Einzelbaumwachstums-Simulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hasenauer, H. 2006. Concepts within tree growth modeling. En: Hasenauer, H. (Ed.), *Sustainable Forest Management. Growth Models for Europe*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 3–17.

- Huang, S., Yang, Y., Wang, Y. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. En: Amaro, A., Reed, D., Soares, P. (Eds.), Modelling forest systems. CAB International, Wallingford, UK, pp. 271–293.
- Hussein, K.A., Albert, M., Gadow, K.v. 2000. The crown window - a simple device for measuring tree crowns. Forstwissenschaftliches Centralblatt 119, 43–50.
- Martínez Millán, F.J., Madrigal, A. 1982. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección. Comunicaciones INIA. Serie Recursos Forestales nº 13.
- Mitscherlich, G. 1971. Wald, Wachstum und Umwelt. 2. Bd: Waldklima und Wasserhaushalt. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- Mitscherlich, G. 1975. Wald, Wachstum und Umwelt. 3. Bd: Boden, Luft und Produktion. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- Monserud, R.A. 1975. Methodology for simulating Wisconsin northern hardwood stand dynamics. Tesis Doctoral. University of Wisconsin, Madison.
- Monserud, R.A., Ek, A.R. 1977. Predicting of understory tree height growth in northern hardwood stands. For. Sci. 23, 391–400.
- Nagel, J. 1995. BWERT: Programm zur Bestandesbewertung und zur Prognose des Bestandes-entwicklung. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, 29–31 Mai, Joachimsthal, pp. 184–198.
- Newnham, R.M. 1964. The development of a stand model for Douglas-fir. Tesis Doctoral. University of British Columbia, Vancouver.
- Palahí, M., Pukkala, T., Miina, J., Montero, G. 2003. Individual-tree growth and mortality models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. Ann. For. Sci. 60, 1–10.
- Pretzsch, H. 1992. Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München, 115. Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität München und der Bayer, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, München.
- Pretzsch, H. 2001. Modellierung des Waldwachstums. Parey, Berlin.
- Pretzsch, H., Biber, P., Dursky, J. 2002. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. For. Ecol. Manage. 162, 3–21.
- Pukkala, T. 1988. Studies on the effect of spatial distribution of trees on the diameter growth of Scots pine. Publications in Science No. 13, University of Joensuu.
- Pukkala, T. 1989. Predicting diameter growth in an even-aged Scots pine stand with a spatial and a non spatial model. Silva Fenn. 23, 101–116.
- Pukkala, T., Kolström, T. 1992. A stochastic spatial regeneration model for *Pinus sylvestris*. Scand. J. For. Res. 7, 377–385.
- Raven, P.H., Evert, R.F., Eichhorn, S.E. 1986. Biology of plants (Cuarta Ed.). Worth Publishers Inc., New York.
- Ribbens, E., Silander, J.A. Jr., Pacala, S.W. 1994. Seedling recruitment in forest: calibrating models to predict patterns of tree seedling dispersion. Ecology 75(6), 1794–1806.
- Sánchez-González, M., del Río, M., Cañellas, I., Montero, G., 2006. Distance independent tree diameter growth model for Cork oak stands. For. Ecol. Manage. 225, 262–270.
- Schröder, J. 2000. Comparison of a spatial and non-spatial model for predicting basal area increment of individual Maritime pine trees in Galicia. Tesis Doctoral. Georg-August-Universität, Göttingen.

- Schröder, J., Gadow, K.v. 1999. Testing a new competition index for maritime pine in north-western Spain. *Can. J. For. Res.* 29, 280–283.
- Schweiger, J., Sterba, H. 1997. A model describing natural regeneration recruitment of Norway spruce (*Picea abies* L.) in Austria. *For. Ecol. Manage.* 97, 107–118.
- Stage, A.R. 1973. Prognosis model for stand development. USDA For. Serv., Res. Pap. INT-137.
- Sterba, H. 1983. Single stem models from inventory data with temporary plots. *Mitt Forstl Bundesversuchsanstalt Wien* 147, 87–101.
- Sterba, H., Moser, M., Hasenauer, H., Monserud, R.A. 1995. PROGNAUS ein abstandsunabhängiger Wachstumssimulator für ungleichaltrige Michbestände. *Deutscher Verband Forstliche Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde*, Eberswalde/Berlin, pp. 173–183.
- Trasobares, A., Pukkala, T., Miina, J. 2004a. Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. *Ann. For. Sci.* 61, 9–24.
- Trasobares, A., Tomé, M., Miina, J. 2004b. Growth and yield model for *Pinus halepensis* Mill. in Catalonia, north-east Spain. *For. Ecol. Manage.* 203, 49–62.
- Vanclay, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield: application to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford, UK.
- Wykoff, W.R. 1990. A basal area increment model for individual conifers in the northern Rocky Mountains. *For. Sci.* 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.
- Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. *For. Sci.* 39(3), 594–616.

6. Desagregación de las variables del rodal

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan unas ecuaciones que se utilizan para “desagregar” o estimar las principales variables de los árboles que caracterizan las clases diamétricas de rodales regulares de las seis especies para las que se han desarrollado modelos de crecimiento para Galicia: *Betula alba*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*. Dichas ecuaciones relacionan el diámetro medio aritmético con el diámetro medio cuadrático y otras variables de rodal, que se pueden obtener de un inventario o estimar a partir de los modelos de crecimiento descritos en los capítulos 3 y 4.

“Desagregación” es un término que se emplea en modelización forestal para definir cualquier metodología que permita enlazar un modelo de rodal con un modelo de clases diamétricas o de árbol individual. Se trata, por tanto, de metodologías que relacionan las estimaciones de las variables de los árboles de un rodal obtenidas con un modelo de árbol individual o de clases diamétricas (p. ej., diámetro normal, altura, volumen, biomasa, etc.) con las estimaciones de las principales variables del rodal obtenidas con un modelo de rodal (p. ej., número de árboles por hectárea, área basimétrica, altura dominante, volumen total, biomasa total, etc.). Para ello, se imponen unas mínimas condiciones de compatibilidad (p. ej., que la suma de las secciones normales de todos los árboles por hectárea sea igual al área basimétrica del rodal, o que la suma de sus volúmenes individuales sea igual al volumen total por hectárea del rodal). Una excelente revisión de las metodologías más habituales para llevar a cabo el proceso de desagregación se puede encontrar en los trabajos de Ritchie y Hann (1997) y de Qin y Cao (2006).

Si sólo se pretende utilizar un modelo de rodal, bien porque no se haya desarrollado uno de árbol individual o de clases diamétricas, o porque no se considera necesario asegurar la compatibilidad entre modelos, el término “desagregación” se emplea para definir las metodologías utilizadas para estimar las principales variables de los árboles individuales o de los árboles que caracterizan las clases diamétricas (p. ej., diámetro normal, altura, volumen, etc.) a partir de los valores conocidos de las principales variables de rodal (p. ej., número de árboles por hectárea, altura dominante, área basimétrica, volumen total, etc.). Este es el caso de los modelos descritos en este capítulo.

La metodología más habitual para llevar a cabo este tipo de desagregación consta de tres pasos:

1. Emplear funciones de densidad o de distribución que permitan caracterizar la distribución diamétrica del rodal, es decir, que permitan estimar el número de árboles que pertenecen

a una determinada clase diamétrica. Los parámetros que definen las funciones de densidad o de distribución deben poder obtenerse a partir de los valores conocidos de las principales variables del rodal.

2. Obtener una relación altura-diámetro para, a partir del diámetro centro de cada clase, estimar la altura del árbol medio que representa a dicha clase diamétrica.
3. Por último, con los valores de diámetro centro de clase y de altura del árbol representativo de la clase diamétrica, se pueden estimar volúmenes totales, volúmenes clasificados por destinos comerciales o biomasa (total o por fracciones), empleando tarifas de volumen o de biomasa de dos entradas o funciones de perfil.

Todo este conjunto de ecuaciones (función de densidad o de distribución, relación altura-diámetro y tarifas de volumen o de biomasa y/o funciones de perfil) constituyen lo que se denomina “sistema de desagregación”. En la figura 6.1 se muestra un esquema de este proceso.

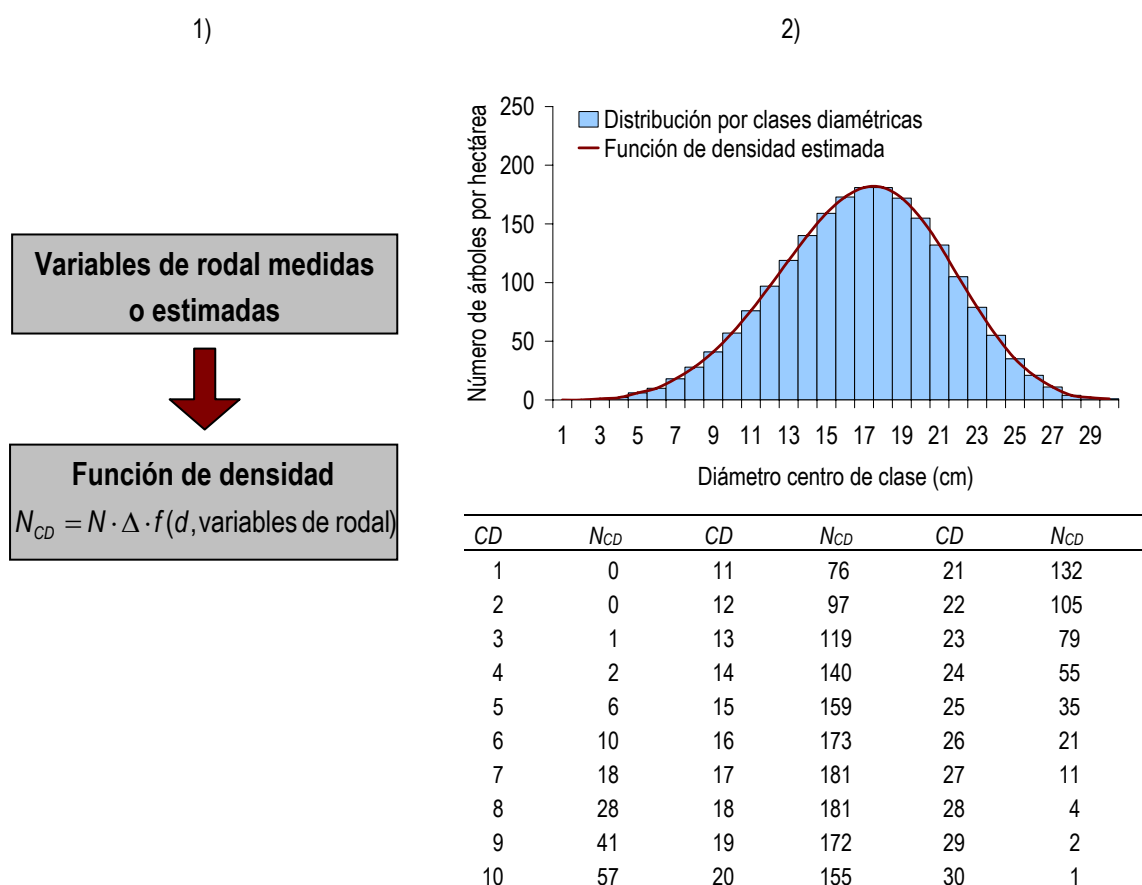


Figura 6.1. Esquema del proceso de desagregación basado en el empleo de funciones de densidad para estimar la distribución del número de árboles por clases diamétricas a partir de las principales variables de rodal. 1) A partir de las variables de rodal se estima la expresión de la función de densidad. 2) Una vez conocida dicha expresión se determina el número de árboles por hectárea N_{CD} de cada clase diamétrica (representada por el diámetro centro de clase CD , cm) en función de su amplitud Δ (cm) y del número total de árboles por hectárea N , como se muestra en el ejemplo.

En este capítulo se va a detallar la primera de las fases del sistema de desagregación descrito, es decir, el empleo de funciones de densidad o de distribución para estimar la distribución diamétrica del rodal, conocidos los valores de sus principales variables.

6.2. Material y métodos

6.2.1. Concepto de función de densidad y función de distribución

Los diámetros de cada uno de los árboles medidos en un inventario suelen resumirse agrupándolos por clases diamétricas, de modo que se asigna a cada una de ellas la frecuencia absoluta y/o relativa (acumulada o sin acumular) de los árboles inventariados que pertenecen a dicha clase. La frecuencia absoluta de una clase diamétrica es el número de árboles que pertenecen a esa clase diamétrica y la frecuencia relativa es el cociente entre la frecuencia absoluta y el número total de árboles. La frecuencia absoluta acumulada de cada clase diamétrica es el número de árboles cuyo diámetro normal es inferior al límite superior de la clase diamétrica, es decir, es la frecuencia absoluta de la clase diamétrica analizada más las frecuencias absolutas de todas las clases diamétricas inferiores. Por último, la frecuencia relativa acumulada es el cociente entre las frecuencias absolutas acumuladas y el número total de árboles. En la tabla 6.1 se muestra un ejemplo de los cuatro tipos de frecuencias descritas.

Tabla 6.1. Distribuciones de frecuencias por clases diamétricas de 4 cm de amplitud para los datos del ejemplo de la figura 6.1.

CD	FA	FAA	FR	FRA
2	0	0	0,000	0,000
6	37	37	0,018	0,018
10	202	239	0,098	0,116
14	515	754	0,250	0,366
18	707	1.461	0,343	0,709
22	471	1.932	0,229	0,937
26	122	2.054	0,059	0,997
30	7	2.061	0,003	1,000

Nota: CD = centro de clase diamétrica (cm); FA = frecuencia absoluta; FAA = frecuencia absoluta acumulada; FR = frecuencia relativa; FRA = frecuencia relativa acumulada.

Todas estas frecuencias se suelen representar gráficamente empleando los denominados histogramas, que igualmente pueden ser de frecuencias absolutas o relativas (acumuladas o sin acumular). En la figura 6.2 se muestran los histogramas obtenidos a partir de las frecuencias de la tabla 6.1.

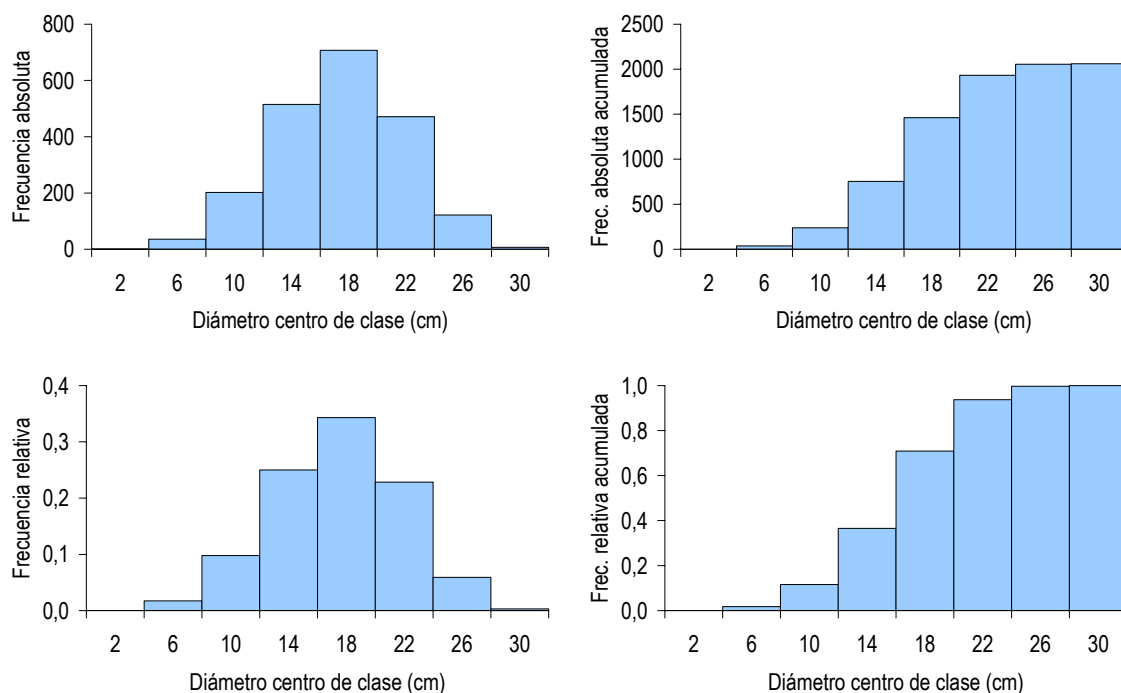


Figura 6.2. Histogramas de frecuencias. En la fila superior están las frecuencias absolutas y en la inferior las relativas. En la columna de la izquierda figuran los valores sin acumular y en la de la derecha los valores acumulados.

La sucesión de barras correspondientes a cada clase diamétrica en los histogramas de frecuencias se puede sustituir por una curva continua que permite estimar la frecuencia (absoluta o relativa, acumulada o sin acumular) correspondiente a un diámetro concreto. La expresión matemática de esa curva se denomina función de densidad $f(d)$ cuando la frecuencia que representa da valores sin acumular (absolutos o relativos), o función de distribución $F(d)$ cuando la frecuencia que representa da valores acumulados (absolutos o relativos).

Puesto que las frecuencias acumuladas se obtienen al ir sumando los valores de las frecuencias sin acumular, el valor de la función de distribución para un cierto diámetro d_1 se obtiene sumando los valores de la función de densidad para todos los diámetros menores o iguales al mismo. Por tanto, al ser una función continua, la función de distribución es la integral con respecto al diámetro de la función de densidad, o lo que es lo mismo, la función de densidad es la derivada con respecto al diámetro de la función de distribución:

$$F(d_1) = \int_0^{d_1} f(d) \cdot dd \quad [6.1]$$

Habitualmente, tanto las funciones de densidad como las de distribución se emplean para obtener frecuencias relativas, tanto de árboles individuales como de clases diamétricas. Así, por ejemplo, si se pretende estimar el número de árboles por hectárea N_{d1} que tienen un cierto

diámetro d_1 utilizando una función de densidad, se debe multiplicar el valor que devuelve la función por el número total de árboles por hectárea del rodal N :

$$N_{d1} = N \cdot f(d_1) \quad [6.2]$$

Si se quiere obtener el número de árboles que pertenecen a una clase diamétrica de centro CD y amplitud Δ utilizando una función de densidad, se debe multiplicar el valor que devuelve la función por el número total de árboles por hectárea del rodal N y por la amplitud de clase considerada:

$$N_{CD} = N \cdot \Delta \cdot f(CD) \quad [6.3]$$

Lógicamente, cuanto mayor sea la amplitud mayor será el error en la estimación del número de pies.

Por último, si se quiere determinar el número de árboles que pertenecen a una clase diamétrica de centro CD y amplitud Δ utilizando una función de distribución, debe integrarse la función de densidad entre $CD - \Delta/2$ y $CD + \Delta/2$, y multiplicar el resultado por el número total de pies por hectárea del rodal N :

$$N_{CD} = N \cdot \int_{CD-\Delta/2}^{CD+\Delta/2} f(d) \cdot dd = N \cdot (F(CD + \Delta/2) - F(CD - \Delta/2)) \quad [6.4]$$

El primer trabajo de caracterización de las distribuciones diamétricas fue llevado a cabo en 1898 por Liocourt, que se centró en el estudio de rodales irregulares. Posteriormente, sus observaciones serían desarrolladas matemáticamente por Meyer en los años cuarenta del siglo XX. Desde entonces se han empleado numerosas funciones de densidad para describir las distribuciones diamétricas. Entre ellas, las más utilizadas y aceptadas para la modelización en masas regulares han sido las funciones A de Charlier, Normal, Beta, Gamma, S_B de Johnson y Weibull (Álvarez González, 1997), siendo esta última la que ha tenido mayor difusión y empleo en los modelos de crecimiento basados en distribuciones diamétricas (Bailey y Dell, 1973; Rennolls et al., 1985; Maltamo et al., 1995; Kangas y Maltamo, 2000), fundamentalmente debido a su flexibilidad y sencillez.

La función Weibull ha proporcionado buenos resultados en la modelización de las distribuciones diamétricas de diferentes especies, tanto coníferas como frondosas, y tanto en rodales puros como mixtos. Así, en España se ha empleado con éxito para *Betula alba* (Gorgoso, 2003), *Fagus sylvatica* (Condés, 1997), *Pinus halepensis* (Erviti, 1991), *Pinus pinaster* (Álvarez González, 1997; Condés, 1997; Álvarez González et al., 2002), *Pinus pinea* (Piqué, 2003), *Pinus radiata* (López-Sánchez, 2000) y *Pinus sylvestris* (Ortega, 1989; Condés, 1997; Río, 1999; Álvarez Taboada, 2000). Por todo ello, la función Weibull ha sido escogida para modelizar las distribuciones diamétricas de las principales especies forestales de Galicia.

6.2.2. La función de densidad Weibull

Fisher y Tippet (1928) presentaron una nueva distribución de probabilidad, y posteriormente Weibull (1939) obtuvo la expresión de la función en unos ensayos de resistencia de materiales. La expresión matemática de la función de densidad Weibull es la siguiente:

$$f(d) = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{d-a}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{d-a}{b}\right)^c\right) \quad [6.5]$$

donde d es el diámetro, a es un parámetro de situación, b es un parámetro de escala, c es un parámetro de forma y todos ellos toman valores positivos. El valor de $f(d)$ representa la frecuencia relativa, en tanto por uno, de los árboles del rodal que tienen como diámetro el valor d .

El parámetro a coincide con el diámetro mínimo de la distribución, por lo que en las parcelas jóvenes se hace coincidir con el diámetro mínimo inventariable. Si se asigna un valor cero a dicho parámetro, es decir, si se considera que el diámetro mínimo del rodal es igual a cero, se obtiene la que se denomina función de densidad Weibull biparamétrica:

$$f(d) = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{d}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{d}{b}\right)^c\right) \quad [6.6]$$

El empleo de la función de densidad Weibull de dos parámetros facilita la estimación de b y c sin que la precisión de sus estimaciones se vea seriamente afectada (Maltamo et al., 1995).

Una vez conocidos los valores de los parámetros, si se emplea directamente la ecuación [6.5] o la ecuación [6.6] se obtendría para cada diámetro d la frecuencia relativa predicha, es decir, el tanto por uno de los árboles del rodal que tienen exactamente dicho diámetro. Como ya se explicó anteriormente, si se pretende determinar el número de árboles N_d (pies/ha) que tienen dicho diámetro d , habrá que multiplicar la expresión anterior por el número total de pies por hectárea del rodal N .

En el caso de que la función de densidad se emplee para determinar el número de árboles que pertenecen a una clase diamétrica N_{CD} , el valor anterior habrá que multiplicarlo también por el tamaño o amplitud de clase Δ (cm). De este modo, la función de densidad Weibull con dos parámetros que se emplea para determinar el número de árboles que pertenecen a una clase diamétrica de centro d y de tamaño Δ es la siguiente:

$$N_{CD} = N \cdot \Delta \cdot \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{d}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{d}{b}\right)^c\right) \quad [6.7]$$

El parámetro de escala b está relacionado con el rango o recorrido de los diámetros del rodal (diferencia entre el diámetro máximo y el mínimo), mientras que el parámetro c define la forma de la curva que representa la distribución diamétrica, de manera que si:

- ✓ $c < 1$ Se obtienen curvas típicas de rodales irregulares.
- ✓ $c = 1$ Coincide con la distribución exponencial.
- ✓ $1 < c < 3,6$ La curva presenta asimetría hacia la derecha.
- ✓ $c = 3,6$ La función de densidad Weibull se aproxima a la normal.
- ✓ $c > 3,6$ La curva presenta asimetría hacia la izquierda.

En la figura 6.3 se muestran varios aspectos que puede adoptar la función de densidad Weibull para diferentes valores de b y c , considerando que el parámetro a es igual a cero.

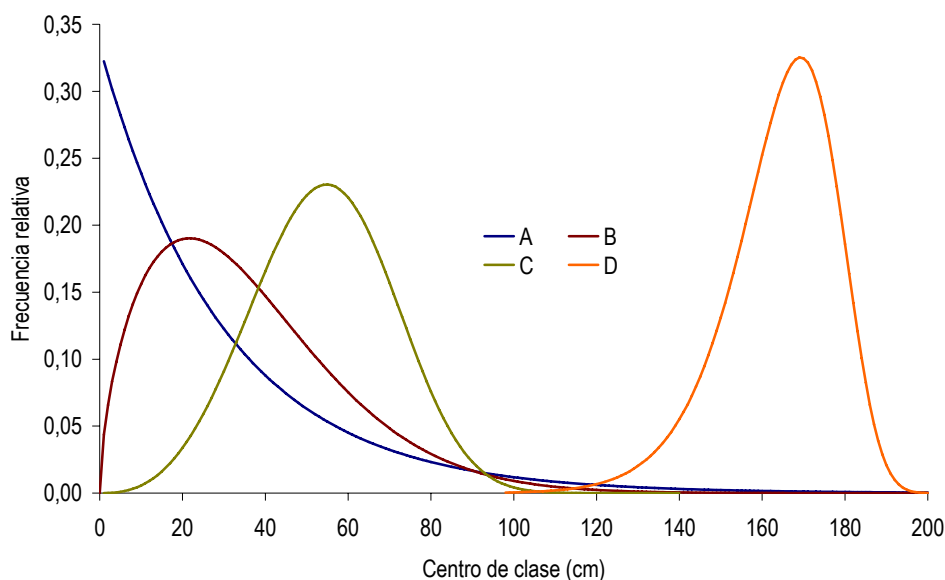


Figura 6.3. Función de densidad Weibull biparamétrica para distintos valores de b y c , considerando que el valor del parámetro a es igual a 0. A ($b = 3$; $c = 1$); B ($b = 4$; $c = 1,6$); C ($b = 6$; $c = 3,6$) y D ($b = 17$; $c = 15$).

Como se observa en la gráfica anterior, esta función es bastante flexible, pero por sí sola no puede adaptarse a distribuciones diamétricas bimodales, aunque sí que se puede caracterizar este tipo de distribuciones enlazando dos funciones de densidad superpuestas. En la figura 6.4 se muestra un ejemplo de dos funciones de densidad Weibull enlazadas para representar una distribución bimodal. La unión entre ambas funciones se garantiza imponiendo condiciones de continuidad. Esta metodología también se puede emplear con las mencionadas funciones A de Charlier, Normal, Beta, Gamma y S_B de Johnson.

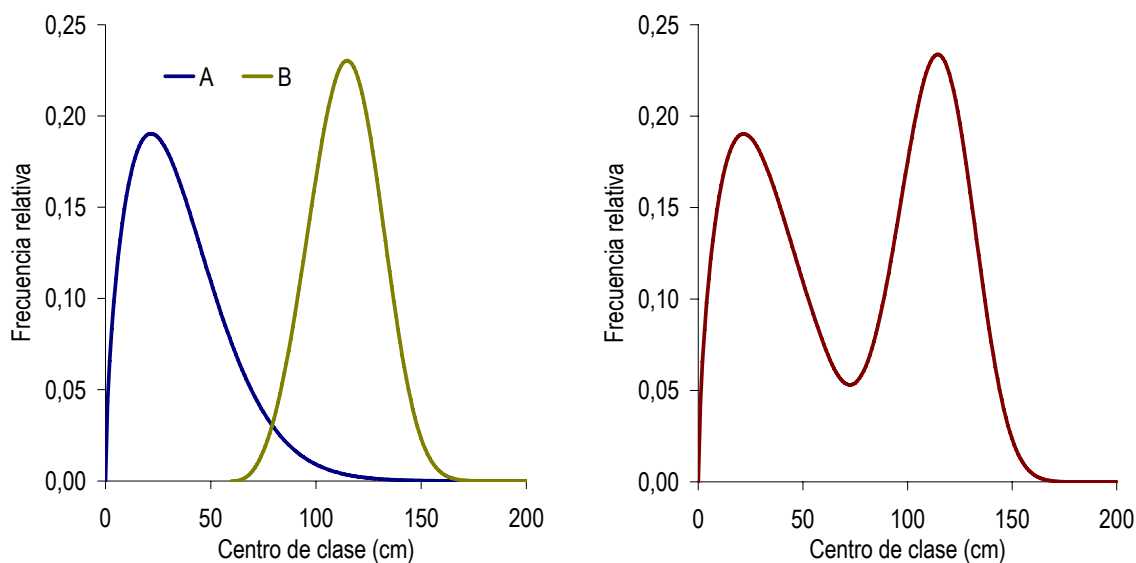


Figura 6.4. Representación de distribuciones bimodales mediante el empleo de dos funciones de densidad Weibull enlazadas. Los valores de los parámetros de la función A son: $a = 0$; $b = 4$; $c = 1,6$; y los de la función B son: $a = 60$; $b = 6$; $c = 3,6$.

6.2.3. Estimación de los parámetros de una función de densidad

Cuando se conoce la distribución diamétrica real de un rodal existen varios métodos para estimar los parámetros de una función de densidad o distribución que la caracterice:

- ✓ Los estimadores de máxima verosimilitud, que cuentan con varios procedimientos de resolución (Rennolls et al., 1985).
- ✓ Los estimadores basados en diversos percentiles de la distribución (Bailey y Dell, 1973; Shiver, 1988).
- ✓ Los estimadores obtenidos por regresión no lineal mediante el empleo de procedimientos iterativos.
- ✓ Los métodos basados en los valores de determinados momentos de la distribución diamétrica (Shifley y Lentz, 1985; Nanang, 1998; Río, 1999).

Si el objetivo es proyectar la función de densidad o de distribución cuando no se conoce el número real de pies en cada clase diamétrica, las metodologías a emplear difieren de las anteriores y se pueden clasificar en alguno de estos dos grupos:

- ✓ Estimación de parámetros.
- ✓ Recuperación de parámetros.

La metodología de estimación de parámetros consiste en establecer relaciones entre distintas variables del rodal y los parámetros de la función de densidad o de distribución ajustada a cada parcela. Por su parte, la recuperación de parámetros se basa en relacionar variables del rodal

(fundamentalmente el área basimétrica, la altura dominante y el número de pies) con percentiles (Cao y Burkhart, 1984) o con momentos (Newby, 1980; Burk y Newberry, 1984) de la distribución diamétrica; las relaciones establecidas se utilizan posteriormente para *recuperar* los parámetros de la función de distribución o de densidad. En ambas metodologías el valor de las variables del rodal en cualquier instante puede obtenerse a partir de un inventario o de un modelo de crecimiento.

El método de recuperación de parámetros que utiliza los momentos de la distribución es la metodología más empleada. Dicha metodología, aplicada a la función de densidad Weibull, es la que se ha empleado en este capítulo para el desarrollo de modelos que permiten proyectar la distribución diamétrica de un rodal a partir de variables dasométricas para las especies *Betula alba*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*, y que es objeto de descripción detallada en el siguiente apartado.

Método de los momentos para estimar los parámetros de la función de densidad Weibull biparamétrica

El método de los momentos aplicado a la función de densidad Weibull de dos parámetros consiste en obtener un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (los dos parámetros) basado en los valores del diámetro medio aritmético (momento de orden 1) y el diámetro medio cuadrático (relacionado con el momento de orden 2, que es la varianza diamétrica) de la distribución diamétrica.

La primera de las ecuaciones del sistema se obtiene a partir del diámetro medio aritmético de la distribución. En el caso de que se conocieran los diámetros de todos los árboles por hectárea del rodal N , el valor de dicho diámetro medio aritmético \bar{d} se obtendría mediante la expresión:

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i \cdot N_{di}}{N} \quad [6.8]$$

donde N_{di} es el número de árboles que tienen un diámetro d_i .

Si, por el contrario, lo que se conoce es la expresión de la función de densidad Weibull biparamétrica (ecuación [6.6]), que es una función continua, el valor del diámetro medio aritmético se obtendría como:

$$\bar{d} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d_i \cdot N_{di} \cdot dd_i}{N} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d_i \cdot N \cdot \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{d_i}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{d_i}{b}\right)^c\right) \cdot dd_i}{N} \quad [6.9]$$

Si se realiza el siguiente cambio de variable: $(d_i/b)^c = z$, entonces:

$$d_i = b \cdot z^{1/c} \quad y \quad dz = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{d_i}{b}\right)^{c-1} \cdot dd_i \quad [6.10]$$

Sustituyendo estos valores en la integral de la ecuación [6.9] y sacando fuera de la misma las constantes se llega a la siguiente expresión:

$$\bar{d} = \frac{N \cdot b \cdot \int_{-\infty}^{\infty} z^{1/c} \cdot \exp(-z) \cdot dz}{N} \quad [6.11]$$

La integral del numerador está relacionada con la función Gamma $\Gamma(a)$, cuya expresión es la siguiente:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} d_i^{a-1} \cdot \exp(-d_i) \cdot dd_i \quad [6.12]$$

En este caso el límite inferior de integración es cero, al contrario que en la ecuación [6.11], pero en ésta la función no existe para valores negativos de diámetro, por lo que los límites son los mismos y finalmente se llega a la siguiente expresión:

$$\bar{d} = b \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) \quad [6.13]$$

Puesto que los valores de la función Gamma están tabulados y se pueden obtener, por ejemplo, en cualquier hoja de cálculo, la ecuación [6.13] relaciona los parámetros b y c con el diámetro medio de la distribución de forma sencilla.

La segunda de las ecuaciones del sistema con dos incógnitas se obtiene a partir del valor del diámetro medio cuadrático d_g del rodal. El razonamiento es el mismo que en el caso anterior. Si se dispone de los diámetros de todos los árboles por hectárea del rodal N , el cuadrado de su diámetro medio cuadrático se obtiene empleando la siguiente expresión:

$$d_g^2 = \frac{\sum d_i^2 \cdot N_{di}}{N} \quad [6.14]$$

donde N_{di} es el número de árboles que tienen un diámetro d_i .

Si lo que se conoce es la función de densidad Weibull de dos parámetros (ecuación [6.6]), el valor de dicho cuadrado del diámetro medio cuadrático se obtendría como:

$$d_g^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d_i^2 \cdot N \cdot \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{d_i}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{d_i}{b}\right)^c\right) \cdot dd_i}{N} \quad [6.15]$$

Si de nuevo se realiza el siguiente cambio de variable: $(d_i/b)^c = z$, entonces:

$$d_i = b \cdot z^{1/c} \quad y \quad dz = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{d_i}{b}\right)^{c-1} \cdot dd_i \quad [6.16]$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación [6.15], sacando fuera de la misma las constantes y teniendo en cuenta la expresión de la función Gamma $\Gamma(a)$ de la ecuación [6.12], se llega a la siguiente expresión:

$$d_g^2 = \frac{b^2 \cdot N \cdot \int_{-\infty}^{\infty} z^{2/c} \cdot \exp(-z) \cdot dz}{N} = b^2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) \quad [6.17]$$

Despejando el valor del parámetro b en la ecuación [6.13] y sustituyendo en la ecuación [6.17] se obtiene una ecuación que depende del diámetro medio \bar{d} , del diámetro medio cuadrático d_g y del parámetro c :

$$d_g^2 = \frac{\bar{d}^2}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right)} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) \quad [6.18]$$

De este modo, si los dos diámetros se pueden estimar, es posible determinar primero el valor del parámetro c , y sustituyendo en la ecuación [6.13] estimar después el valor del parámetro b .

Obtención de los diámetros medio aritmético y cuadrático a partir de otras variables de rodal

El valor del diámetro medio cuadrático d_g (m) del rodal a cualquier edad se puede calcular a partir de los valores del número de pies por hectárea N y del área basimétrica G (m²/ha), que se pueden obtener de los modelos de crecimiento descritos en los capítulos 3 y 4:

$$d_g = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot N}} \quad [6.19]$$

Sin embargo, el valor del diámetro medio aritmético \bar{d} debe ser estimado, puesto que no se puede obtener directamente a partir de las variables de rodal que aportan los modelos

mencionados. Por tanto, es necesario ajustar una relación entre el diámetro medio aritmético y dichas variables de rodal. Puesto que el diámetro medio aritmético de un rodal siempre es menor o igual que su diámetro medio cuadrático, la relación a ajustar debe cumplir esta condición de compatibilidad, y para ello se utiliza un modelo matemático que cumple dicha restricción:

$$\bar{d} = d_g - \exp(\mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\beta}) \quad [6.20]$$

siendo \mathbf{X} un vector de variables de rodal (p. ej., altura dominante, número de pies por hectárea, edad, etc.) que caracterizan el estado del mismo a cualquier edad y que pueden ser obtenidas de un modelo de rodal (estático o dinámico) o de un inventario en el que sólo se obtengan variables de rodal, y $\boldsymbol{\beta}$ es un conjunto de parámetros que dependen de la especie y que se deben estimar. Como se observa en la ecuación [6.20], al tomar la función exponencial siempre valores positivos o cero, el diámetro medio aritmético es menor o igual que el diámetro medio cuadrático. Este tipo de relación ha sido utilizada con frecuencia con el mismo propósito de determinar los valores de los parámetros de una función de densidad empleando el método de recuperación de parámetros (p. ej., Cao et al., 1982; Burk y Burkhart, 1984; Knoebel et al., 1986).

Por tanto, el primer paso del proceso de desagregación, que consiste en determinar la distribución diamétrica del rodal, desde el punto de vista de la modelización se reduce al ajuste de una relación entre el diámetro medio aritmético, el diámetro medio cuadrático y otras variables de rodal que se puedan estimar a partir de un modelo de crecimiento.

6.2.4. Datos

En este capítulo se presenta el ajuste de la ecuación [6.20] para las seis especies para las que se han desarrollado modelos de crecimiento para Galicia: *Betula alba*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*.

El conjunto de datos utilizado, para todas las especies excepto para *Pinus pinaster*, está compuesto por las mediciones realizadas en la red de parcelas del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela. La descripción detallada del conjunto de datos empleado se puede consultar en el capítulo 3 para *Betula alba*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*, y en el capítulo 4 para *Pinus radiata* y *Pinus sylvestris*.

En el caso de *Pinus pinaster* se han utilizado datos de dispositivos experimentales instalados por otros organismos, tal y como se describe también en el capítulo 4.

6.3. Resultados

En la tabla 6.2 se muestran las relaciones entre el diámetro medio aritmético, el diámetro medio cuadrático y otras variables de rodal ajustadas a los datos antes citados para las seis especies analizadas. Estas ecuaciones, en el caso de las tres especies de pino, son las que ya se han expuesto como funciones de salida al describir los modelos dinámicos en el capítulo 4 y que, por tanto, utiliza el simulador de crecimiento GesMO® 2009 que se incluye en el CD-ROM que acompaña al libro. En el caso de *Betula alba* y *Quercus robur*, las ecuaciones son las publicadas en el trabajo de Gorgoso et al. (2008). Por último, la ecuación que se presenta para *Pseudotsuga menziesii* es la desarrollada por López-Sánchez (2009). Todos los parámetros de las ecuaciones han resultado significativos al nivel del 5%.

En la tabla 6.3 se muestran los valores de los correspondientes estadísticos de bondad del ajuste, el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), cuyas expresiones y significado se detallan en el anexo II. Como se aprecia, las relaciones obtenidas explican más del 99% de la variabilidad total del diámetro medio del rodal para las seis especies, con errores medios que no superan los 0,59 cm.

Tabla 6.2. Ecuaciones que relacionan el diámetro medio aritmético con el diámetro medio cuadrático y variables de rodal según la ecuación [6.20], de las seis especies para las que se han desarrollado modelos de crecimiento para Galicia.

Especie	Ecuación
<i>Betula alba</i>	$\bar{d} = d_g - \exp(-2,126 + 0,06588 \cdot H_0 + 0,02123 \cdot t)$
<i>Pinus pinaster</i>	$\bar{d} = d_g - \exp\left(-0,4456 - \frac{10,99}{t} + 0,02221 \cdot H_0\right)$
<i>Pinus radiata</i>	$\bar{d} = d_g - \exp\left(0,1449 - \frac{19,76}{t} + 0,0001345 \cdot N + 0,03264 \cdot IS\right)$
<i>Pinus sylvestris</i>	$\bar{d} = d_g - \exp(-1,294 + 0,0001867 \cdot N + 0,03625 \cdot H_0)$
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	$\bar{d} = d_g - \exp(-1,777 + 0,0005588 \cdot N + 0,04945 \cdot H_0)$
<i>Quercus robur</i>	$\bar{d} = d_g - \exp(-0,3666 + 0,02946 \cdot H_0)$

Nota: \bar{d} = diámetro medio aritmético (cm); d_g = diámetro medio cuadrático (cm); H_0 = altura dominante (m); t = edad del rodal (años); N = número de pies por hectárea; IS = índice de sitio (m, ver capítulo 2).

Tabla 6.3. Estadísticos de bondad del ajuste de la relación entre los diámetros medio aritmético y medio cuadrático y variables de rodal según la ecuación [6.20], de las seis especies para las que se han desarrollado modelos de crecimiento para Galicia.

Especie	R^2	REMC (cm)
<i>Betula alba</i>	0,942	0,85
<i>Pinus pinaster</i>	0,999	0,17
<i>Pinus radiata</i>	0,998	0,33
<i>Pinus sylvestris</i>	0,999	0,03
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,996	0,38
<i>Quercus robur</i>	0,990	0,59

6.4. Ejemplo de utilización del método de los momentos para la función de densidad Weibull de dos parámetros

En el CD-ROM adjunto a este libro se incluye el archivo de Microsoft® Office Excel 2003 de nombre 06_DD.xls (“Distribución Diamétrica”), que permite proyectar la distribución de diámetros y de secciones normales de un rodal a partir de variables dasométricas, de las especies para las que se presentan las ecuaciones de la tabla 6.2, así como representar las distribuciones generadas en un gráfico.

Para ilustrar los cálculos que se realizan en dicho archivo, a continuación se expone un ejemplo de aplicación del proceso de desagregación para un rodal de *Pinus sylvestris*, que tiene 12 años de edad, una altura dominante de 6,4 m, 1.200 pies/ha y un área basimétrica de 24,3 m²/ha.

En primer lugar se determina el diámetro medio cuadrático mediante la ecuación [6.19]:

$$d_g = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot N}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 24,3}{\pi \cdot 1.200}} = 0,161 \text{ m} = 16,1 \text{ cm} \quad [6.21]$$

A continuación se emplea la ecuación de la tabla 6.2 correspondiente a *Pinus sylvestris* para estimar el diámetro medio del rodal:

$$\begin{aligned} \bar{d} &= d_g - \exp(-1,294 + 0,0001867 \cdot N + 0,03625 \cdot H_0) = \\ &= 16,1 - \exp(-1,294 + 0,0001867 \cdot 1.200 + 0,03625 \cdot 6,4) = 15,6 \text{ cm} \end{aligned} \quad [6.22]$$

Estos dos valores se sustituyen en la ecuación [6.18] para, empleando un método iterativo de determinación de raíces de una ecuación no lineal (se puede utilizar la aplicación que se adjunta al libro), estimar el valor del parámetro c de la función de densidad Weibull de dos parámetros:

$$d_g^2 = \frac{\bar{d}^2}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{c}\right)} \cdot \Gamma\left(1+\frac{2}{c}\right) \Rightarrow 16,1^2 = \frac{15,6^2}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{c}\right)} \cdot \Gamma\left(1+\frac{2}{c}\right) \Rightarrow c = 4,82 \quad [6.23]$$

El siguiente paso es estimar el valor del parámetro b de la función de densidad Weibull de dos parámetros empleando la ecuación [6.13]:

$$\bar{d} = b \cdot \Gamma\left(1+\frac{1}{c}\right) \Rightarrow b = \frac{\bar{d}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{c}\right)} = \frac{15,6}{\Gamma\left(1+\frac{1}{4,82}\right)} = 17,1 \quad [6.24]$$

Por último, el número de árboles por hectárea de cualquier clase diamétrica se obtiene empleando la ecuación [6.7]. En la tabla 6.4 se muestra el resultado obtenido para el rodal del ejemplo con clases diamétricas de 4 cm, y en la figura 6.5 se representan las distribuciones del número de pies por hectárea y del área basimétrica para esas mismas clases diamétricas.

Tabla 6.4. Resultados del proceso de desagregación por clases diamétricas de 2 cm de amplitud del rodal del ejemplo empleando el método de los momentos y la función de densidad Weibull con dos parámetros.

Centro de clase diamétrica (cm)	N_{CD} (pies/ha)	G_{CD} (m ² /ha)
2	0,2	0,0
4	2,7	0,0
6	12,5	0,0
8	36,7	0,2
10	81,8	0,6
12	147,4	1,7
14	216,9	3,3
16	254,7	5,1
18	227,7	5,8
20	144,4	4,5
22	59,2	2,2
24	14,0	0,6
26	1,7	0,1
28	0,1	0,0
Total	1.200,0	24,3

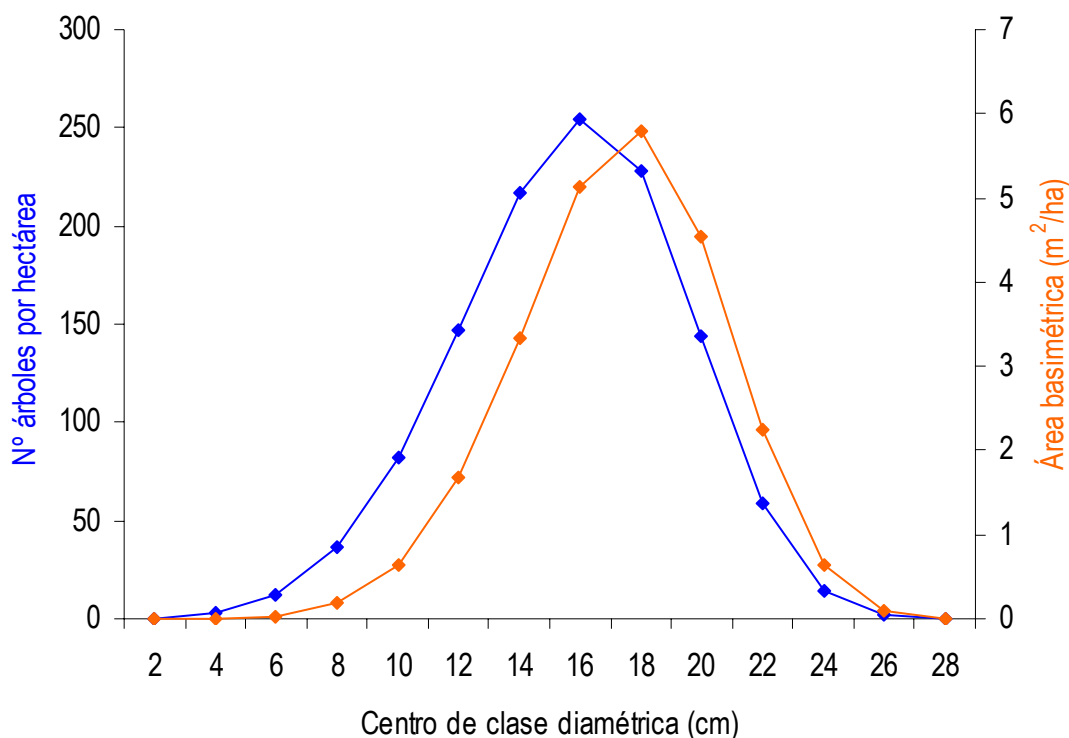


Figura 6.5. Representación gráfica de la distribución del número de pies y del área basimétrica por clases diamétricas obtenidas al aplicar, a los datos del rodal del ejemplo, el método de los momentos asociado a la función de densidad Weibull con dos parámetros.

6.5. Bibliografía

- Álvarez González, J.G. 1997. Análisis y caracterización de las distribuciones diamétricas de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Álvarez González, J.G., Schröder, J., Rodríguez Soalleiro, R., Ruiz, A.D. 2002. Modelling the effect of thinnings on the diameter distributions of even-aged Maritime pine stands. *For. Ecol. Manage.* 165, 57-65.
- Álvarez Taboada, M.F. 2000. Caracterización de las distribuciones diamétricas de las masas de *Pinus sylvestris* L. en la Sierra de Guadarrama. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Bailey, R.L., Dell, T.R. 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *For. Sci.* 19(2), 97-104.
- Bará, S., Toval, G. 1983. Calidad de estación de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales nº 24, Madrid.
- Burk, T.E., Burkhart, H.E. 1984. Diameter distributions and yields of natural stands of loblolly pine. School of Forestry and Wildlife Resources, VPI & SU, Publication No. FSW 1-84.

- Burk, T.E., Newberry, J.D. 1984. A simple algorithm for moment-based recovery of Weibull distribution parameters. *For. Sci.* 30(2), 329-332.
- Cao, Q.V., Burkhart, H.E. 1984. A segmented distribution approach for modeling diameter frequency data. *For. Sci.* 30(1), 129-137.
- Cao, Q.V., Burkhart, H.E., Lemin, R.C. 1982. Diameter distributions and yields of thinned loblolly pine plantations. School of Forestry and Wildlife Resources, VPI & SU, Publication No. FSW-1-82.
- Condés, S. 1997. Simulación de parcelas arboladas con datos del Segundo Inventario Forestal Nacional. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Echeverría, I., De Pedro, S. 1948. El *Pinus pinaster* en Pontevedra: su productividad normal y aplicación a la celulosa industrial. Boletín IFIE nº 38, Madrid.
- Erviti, J.J. 1991. Desarrollo de modelos de crecimiento y producción de las masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. en España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Fisher, R.A., Tippett, L.H.C. 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. En: 24th Camb. Philos. Soc. Proc., 180-190.
- Gorgoso, J.J. 2003. Caracterización de las distribuciones diamétricas de *Betula alba* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Gorgoso, J.J., Rojo, A., Afif-Khouri, A., Barrio-Anta, M. 2008. Modelling diameter distributions of birch (*Betula alba* L.) and pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in northwest Spain with the beta distribution. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 17(3), 271-281.
- Kangas, A., Maltamo, M. 2000. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. *For. Sci.* 46(3), 390-396.
- Knoebel, B.R., Burkhart, H.E., Beck, D.E. 1986. A growth and yield model for thinned stands of Yellow-Poplar. *For. Sci.. Monograph* 27.
- López-Sánchez, C.A., 2000. Caracterización de las distribuciones diamétricas de las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- López-Sánchez, C.A. 2009. Estado selvícola y modelos de crecimiento y gestión de plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en España. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Maltamo, M., Puumalainen, J., Päivinen, R. 1995. Comparison of beta and Weibull functions for modelling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand. J. For. Res.* 10, 284-295.
- Nanang, D.M. 1998. Suitability of the Normal, Log-Normal and Weibull distributions for fitting diameter distributions of neem plantations in Northern Ghana. *For. Ecol. Manage.* 103(1), 1-7.
- Newby, M. 1980. The properties of moment estimators for the Weibull distribution based on the sample coefficient of variation. *Technometrics* 22, 187-194.
- Ortega, A. 1989. Modelos de evolución de masas de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Piqué, M. 2003. Modelos de producción para las masas de *Pinus pinea* L. en Catalunya: orientaciones para la gestión y aprovechamiento de madera y piña. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida.
- Qin, J., Cao, Q.V. 2006. Using disaggregation to link individual-tree and whole-stand growth models. *Can. J. For. Res.* 36, 953-960.

- Rennolls, K., Geary, D.N., Rollison, T.J.D. 1985. Characterizing diameter distributions by the use of the Weibull distribution. *Forestry* 58(1), 57-66.
- Río, M. del. 1999. Régimen de claras y modelo de producción para *Pinus sylvestris* L. en los Sistemas Central e Ibérico. Tesis Doctorales INIA nº 2, Serie Forestal. Madrid.
- Ritchie, M.W., Hann, D.W. 1997. Implications of disaggregation in forest growth and yield modeling, *For. Sci.* 43, 223-233.
- Shifley, S., Lentz, E. 1985. Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. *For. Ecol. Manage.* 13, 195-203.
- Shiver, B.D. 1988. Sample sizes and estimation methods for the Weibull distribution for unthinned slash pine plantation diameter distributions. *For. Sci.* 34(3), 809-814.
- Weibull, W. 1939. A statistical theory of the strength of material. *Ing. Vetensk Akad Handl* 153.

7. Relación altura-diámetro

7.1. Introducción

En este capítulo se presentan unas ecuaciones que relacionan la altura total de los árboles con su diámetro normal y con otras variables del rodal en el que están incluidos, para las siguientes especies: *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*.

Conocer el valor de la altura de los árboles de un rodal es muy importante en la gestión forestal, ya que esta variable se utiliza para muchos propósitos. En primer lugar, el diámetro normal y la altura total de un árbol permiten predecir con gran exactitud su volumen total o comercial mediante el uso de una tarifa de cubicación, una función de perfil de tronco o una tarifa de volumen porcentual (ver capítulo 8). En segundo lugar, en rodales regulares es habitual emplear la altura dominante y la edad para estimar la productividad de la estación forestal, generalmente mediante el índice de sitio (ver capítulo 2). Por último, el valor de la altura de los árboles de un rodal es una información imprescindible para caracterizar su estructura vertical. La estructura y la diversidad son, junto con la densidad, las principales características que definen los rodales forestales (Gadow et al., 2001).

La medición de la altura de un árbol en pie es más difícil y costosa de realizar que la de su diámetro normal, a pesar de las sustanciales mejoras en rapidez y precisión de los hipsómetros actuales. Por ello, para limitar el número de mediciones de alturas, se emplean las funciones altura-diámetro ($h-d$), también conocidas como curvas de alturas.

El procedimiento más empleado en los inventarios forestales consiste en medir el diámetro normal de todos los árboles de una serie de parcelas distribuidas de forma aleatoria o sistemática por el rodal que se pretende inventariar, pero sólo medir una muestra representativa de alturas. En estos casos, la altura de los árboles en los que sólo se mide el diámetro se estima mediante una función $h-d$ que se denomina “local”. Si no se mide ninguna altura o sólo una pequeña muestra (correspondiente, por ejemplo, a los árboles dominantes), es preciso usar una función $h-d$ que se llama “generalizada”.

7.1.1. Funciones $h-d$ locales

Las funciones $h-d$ ajustadas para cada rodal se denominan funciones locales o curvas locales de alturas. Para ajustar dichas funciones es necesario seleccionar previamente una muestra de árboles del rodal y medir en ellos su diámetro normal y su altura total.

Generalmente se acepta que se debe medir la altura de al menos 20-25 árboles en cada rodal para obtener una estimación de la verdadera curva media de alturas con suficiente precisión (Laar y Akça, 2007). Además, esta muestra de alturas ha de seleccionarse de manera que queden representadas todas las clases diamétricas que haya en el rodal.

Dicho muestreo se puede hacer de forma estratificada (considerando como estratos las clases de diámetros presentes) o de forma aleatoria. En el primer caso, el número de pies a medir puede ser constante para cada clase diamétrica o proporcional al número de pies en cada una de ellas (lo más habitual). Incluso, si se quiere obtener una mejor representación en las clases que acumulan mayor volumen, se puede realizar un muestreo proporcionalmente al área basimétrica de cada clase diamétrica. De cualquier manera, dentro de cada clase los árboles deben seleccionarse de forma aleatoria. En el caso de optar por un muestreo aleatorio, los árboles a medir se seleccionarán al azar entre todos aquellos en los que se haya medido el diámetro.

La opción del muestreo estratificado es menos eficiente en tiempo y en coste económico, ya que requiere conocer previamente la distribución diamétrica de los árboles del rodal. Además, según han demostrado algunos autores (p. ej., Arabatzis y Burkhart, 1992), el muestreo aleatorio mejora la precisión de las estimaciones de la curva local de alturas, considerando como criterio de precisión el error medio cuadrático.

Para expresar la relación entre los pares de observaciones de diámetro normal y altura total pueden utilizarse funciones lineales o, más usualmente, no lineales. Una completa recopilación de las mismas se puede encontrar en los trabajos de Huang et al. (1992), Fang y Bailey (1998) y Peng (1999). En la tabla 7.1 se muestran algunas funciones de dos y tres parámetros utilizadas habitualmente para expresar esta relación. Se recomiendan especialmente las funciones de este tipo ya que, generalmente, son sencillas de ajustar y proporcionan buenas estimaciones de la altura. Aunque existen funciones de crecimiento que dependen de cuatro o más parámetros, esta sobreparametrización puede dar lugar a problemas de convergencia o inestabilidad de las estimaciones de los parámetros (Fang y Bailey, 1998).

Tabla 7.1. Funciones con dos y tres parámetros habitualmente utilizadas para describir relaciones h - d locales.

Funciones h - d locales con dos parámetros	Funciones h - d locales con tres parámetros
$h = a \cdot d^b$	$h = a \cdot d^{b \cdot c}$
$h = d^2 / (a + b \cdot d)^2$	$h = d^2 / (a + b \cdot d + c \cdot d^2)$
$h = \exp(a + b/d)$	$h = \exp(a + b \cdot d^c)$
$h = a \cdot \exp(b/d)$	$h = a \cdot \exp(b/(c + d))$
$h = a + b/d$	$h = a + b/(c + d)$
$h = a + b \cdot d^2$	$h = a + b \cdot c + c \cdot d^2$
$h = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot d))$	$h = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot d))^c$
$h = a + b \cdot \ln d$	$h = a + b \cdot (1 - \exp(-c \cdot d))$
$h = a \cdot d / (b + d)$	$h = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot d^c))$

Nota: h = altura total del árbol; d = diámetro normal con corteza; a , b , c = parámetros a estimar mediante el ajuste.

Estas funciones, tal y como se presentan, tienen como origen de coordenadas el punto (0, 0), si bien se pueden forzar a que pasen por el punto de diámetro normal 0 y altura 1,3 m añadiendo, como término aditivo, dicho valor de altura en la parte derecha de la función. Esta restricción es razonable desde un punto de vista teórico, aunque raras veces hay interés en la predicción de la altura total en árboles con un diámetro normal próximo a cero.

Las funciones h - d locales (figura 7.1) son las curvas de alturas más precisas que se pueden ajustar para un determinado rodal, proporcionando por tanto las mejores estimaciones de alturas de los árboles individuales en función de su diámetro normal. Sin embargo, presentan el inconveniente de que requieren la medición de la altura en muchos árboles del rodal, resultando, por tanto, muy costosas.

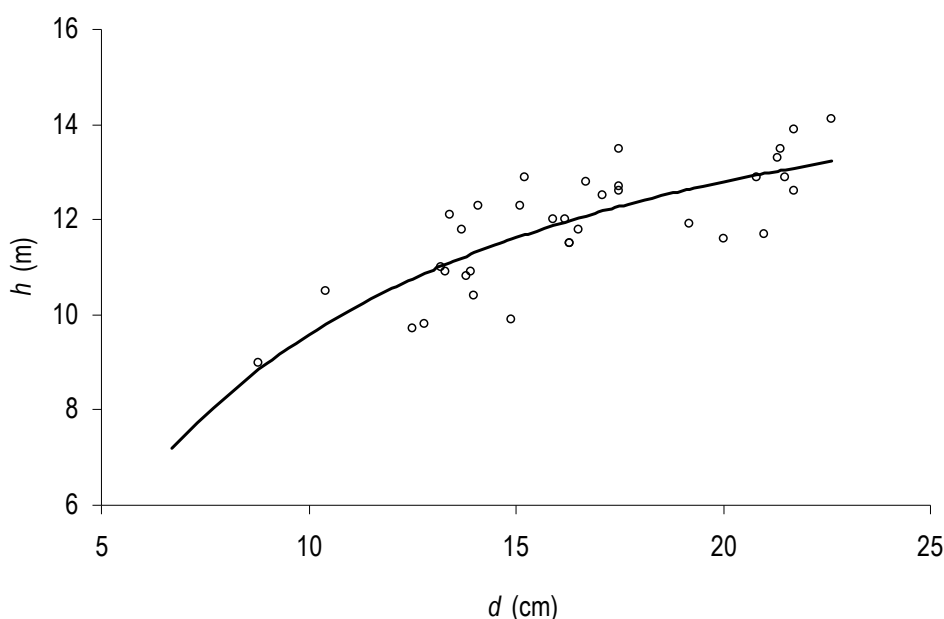


Figura 7.1. Función h - d local ajustada a 35 pares de datos de diámetro normal d y altura total h de un mismo rodal.

7.1.2. Funciones h - d generalizadas

La heterogeneidad de condiciones estacionales y el diferente estado selvícola de los rodales regulares que se pueden encontrar dentro de una masa forestal hacen que una única función h - d local no se pueda ajustar bien a todas las posibles situaciones, ya que:

- ✓ La relación h - d de un rodal regular no permanece constante en el tiempo, si no que se desplaza en sentido creciente de ambas variables con la edad (Curtis, 1967; Assmann, 1970). Esto implica que, para un rodal regular concreto, árboles que a distintas edades tienen igual diámetro pertenecen a clases sociológicas diferentes (figura 7.2).
- ✓ La curva de alturas en estaciones de buena calidad tiene una mayor pendiente que en las de mala calidad (figura 7.3), debido a que aumenta la competencia y, por tanto, la diferenciación en tamaño entre árboles dominantes y dominados (Prodan et al., 1997).

- ✓ Los árboles que crecen en rodales con un elevado número de pies por unidad de superficie poseen un diámetro más pequeño, para una misma altura, que otros que crecen en rodales menos densos (figura 7.4), como consecuencia de una mayor competencia entre los individuos (Prodan et al., 1997; Zhang et al., 1997).

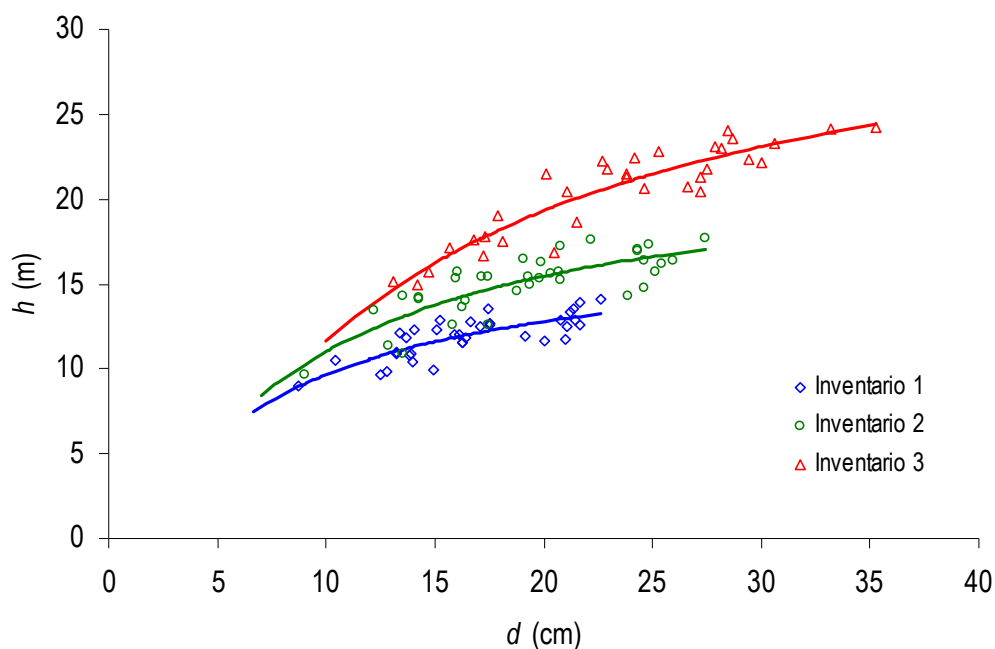


Figura 7.2. Curvas locales de alturas correspondientes a un mismo rodal inventariado en tres ocasiones.

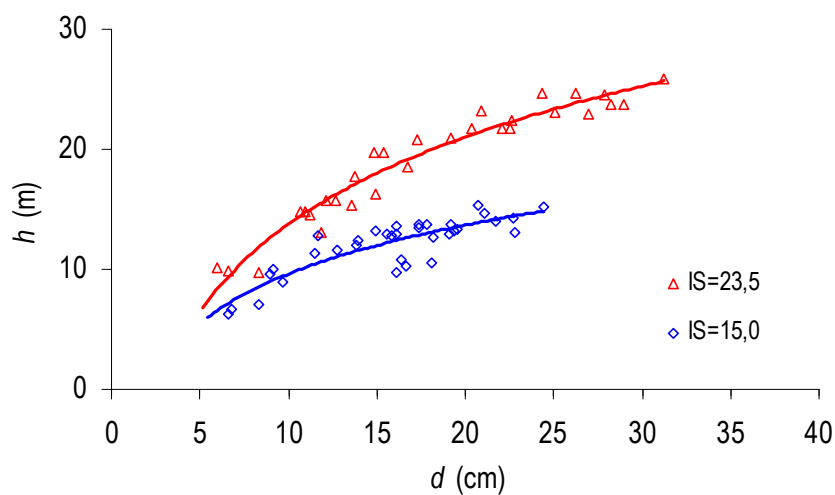


Figura 7.3. Curvas locales de alturas para dos rodales de *Pinus radiata* de la misma edad (20 años), igual número de pies/ha (1.500) y diferente índice de sitio (IS).

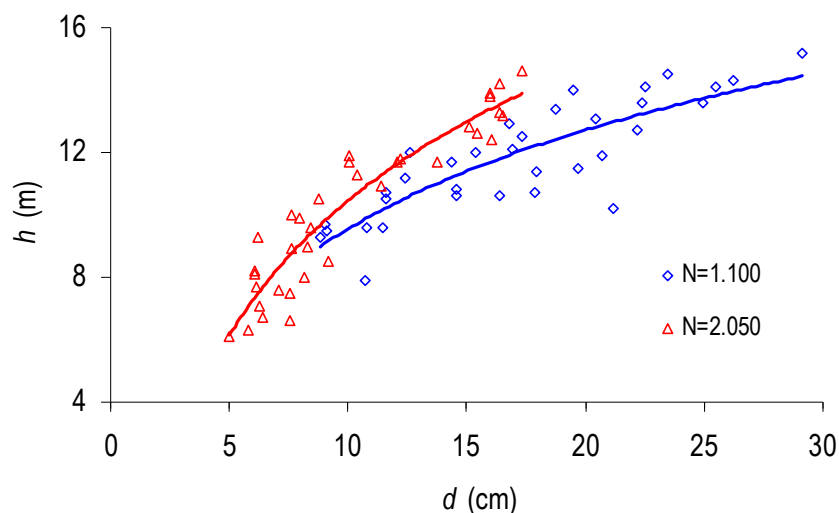


Figura 7.4. Curvas locales de altura para dos rodales de *Pinus radiata* de la misma edad (16 años), igual índice de sitio (17 m) y diferente número de pies/ha (N).

Por tanto, en una masa forestal de una determinada especie que contenga rodales regulares con variaciones evidentes en cuanto a edad, calidad de estación o densidad, una única función $h-d$ ajustada para toda la masa no reflejaría correctamente dicha heterogeneidad, y presentaría una gran variabilidad en torno a la línea de regresión, como se puede apreciar en la figura 7.5.

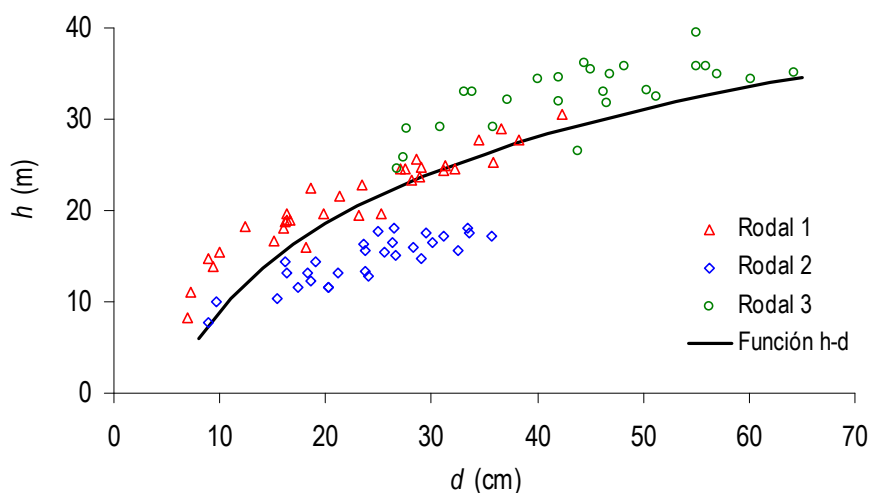


Figura 7.5. Función $h-d$ ajustada a pares de datos de diámetro normal y altura total procedentes de tres rodales distintos de *Pinus radiata* pertenecientes a una misma masa.

En estos casos, si no es posible tomar una muestra suficiente de pares de datos diámetro-altura para ajustar una función $h-d$ local a cada rodal, una alternativa práctica para reducir el error en la estimación de alturas es emplear una ecuación $h-d$ que se denomina “generalizada”, en la que intervengan variables de rodal. Una ecuación $h-d$ generalizada, por tanto, permite predecir la altura de cada árbol conociendo su diámetro normal y una o más variables de rodal (p. ej., altura dominante, diámetro medio cuadrático, diámetro dominante,

número de pies por hectárea, área basimétrica, edad, índice de sitio, etc.), con las que es posible tener en cuenta la evolución en el tiempo de la relación entre la altura y el diámetro, la calidad de estación y la densidad. Generalmente, estas variables de rodal se seleccionan de manera que no representen costos adicionales excesivamente importantes en la toma de datos.

Según muchos autores (p. ej., Gaffrey, 1988; López-Sánchez et al., 2003) es necesario incluir alguna altura de rodal en la función $h-d$ generalizada para obtener estimaciones precisas e insesgadas de las alturas de los árboles individuales. Habitualmente se utiliza la altura dominante, ya que es una variable que sólo requiere la medición de la altura en los árboles de mayores dimensiones (ver apartado 2.1.6 y anexo I) y es relativamente independiente de los tratamientos selvícolas de claras realizados. Excepciones a esto pueden ser los rodales de especies que se plantan a marco definitivo, como es generalmente el caso de los eucaliptos (*Eucalyptus* spp.) y los chopos (*Populus* spp.), en los que el empleo de la altura media como altura de rodal puede proporcionar incluso mejores resultados que la altura dominante. En este caso, sería necesario analizar a cuántos árboles habría que medirles la altura para que la estimación de la altura media del rodal permitiese obtener con fiabilidad suficiente la curva de alturas a partir de la función $h-d$ generalizada, con el objetivo de averiguar si compensa su empleo frente a una función $h-d$ local.

Además de una altura de rodal, también suele ser necesario incluir alguna variable dasométrica que tenga en cuenta implícita o explícitamente la densidad, como el número de pies, el área basimétrica o algún tipo de diámetro medio o dominante (Sloboda et al., 1993; Mønness, 1982; Páscoa, 1987).

Adicionalmente, a veces también se incluyen la edad del rodal o el índice de sitio como variables predictoras (Curtis, 1967; Tomé, 1988; Amateis et al., 1995). La inclusión de estas variables generalmente no supone un esfuerzo adicional de muestreo cuando se trabaja con rodales procedentes de repoblación, ya que en ellos es habitual disponer de la fecha de plantación o es posible estimarla fácilmente, mientras que el índice de sitio puede determinarse a partir de unas curvas de calidad de estación si se conoce la altura dominante del rodal.

La principal ventaja de utilizar una función $h-d$ generalizada es que permite estimar de forma precisa la altura de los árboles individuales conociendo sólo su diámetro normal y algunas variables dasométricas del rodal al que pertenecen. Al contrario de lo que ocurre con las funciones $h-d$ locales, no es necesaria la medición de la altura de una muestra grande de árboles (incluso a veces no es preciso medir ninguna altura), ni tampoco hay que realizar un ajuste estadístico individualizado para cada rodal, por lo que el esfuerzo de muestreo que requieren para su aplicación es menor y el proceso de estimación de las alturas es más sencillo.

En este caso, la función $h-d$ generalizada que se utiliza para estimar alturas es la misma para todos los rodales de una misma especie, si bien al depender de variables dasométricas específicas de cada rodal la función se adapta a la dispersión de los pares de datos diámetro-altura existente en cada uno de ellos (figura 7.6).

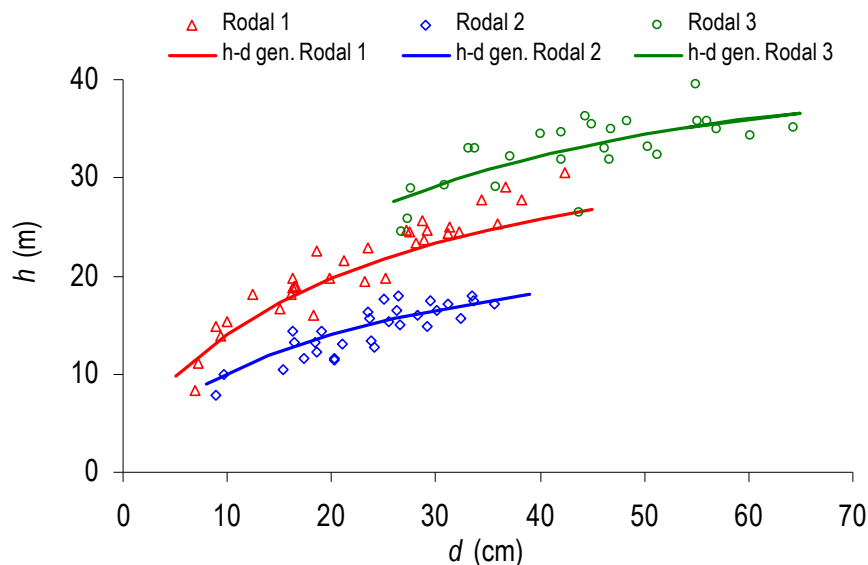


Figura 7.6. Superposición de una curva generalizada de alturas a los pares de datos diámetro-altura de los tres rodales regulares de *Pinus radiata* pertenecientes a una misma masa representados en la figura 7.5.

7.2. Material y métodos

El ajuste de curvas locales de alturas ha de realizarse a partir de pares de observaciones diámetro-altura tomados en cada rodal, pudiendo emplearse algunas de las funciones expuestas en la tabla 7.1. Las funciones $h-d$ generalizadas, sin embargo, al incorporar variables de rodal, tienen un ámbito de aplicación más amplio que las funciones $h-d$ locales, pudiendo considerarse válidas a escala regional. Por ello, son las únicas que van a ser objeto de exposición en este capítulo.

En la selección de los modelos $h-d$ generalizados a analizar en los ajustes se ha considerado prioritario que las estimaciones de la altura dominante obtenidas mediante la función coincidiesen con dicha altura cuando se introduce como diámetro normal el valor del diámetro dominante del rodal. Por otra parte, habitualmente las funciones (tanto locales como generalizadas) que describen la relación $h-d$ no son lineales en los parámetros, por lo que han de ajustarse por procedimientos de regresión no lineal.

Hasta el momento se han publicado ecuaciones $h-d$ generalizadas aplicables para Galicia de las siguientes especies: *Pinus pinaster* (Castedo-Dorado et al., 2005), *Pinus radiata* (López-Sánchez et al., 2003; Castedo-Dorado et al., 2006), *Pinus sylvestris* (Diéguez-Aranda et al., 2005), *Pseudotsuga menziesii* (López-Sánchez, 2009) y *Quercus robur* (Barrio-Anta et al., 2004). Todas ellas se han desarrollado a partir de los datos recogidos en la red de parcelas permanentes del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela, descrita en el capítulo 1, y en otros dispositivos experimentales instalados por otros organismos, como se describe a continuación.

Recientemente, miembros del grupo de investigación han elaborado una función $h-d$ generalizada para las masas de *Eucalyptus globulus* a partir de datos procedentes del Segundo y del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN2 e IFN3, respectivamente).

7.2.1. Datos

El conjunto de datos utilizado está compuesto por las mediciones realizadas en 80.468 árboles muestreados en rodales regulares monoespecíficos de las especies *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur* en Galicia.

Para la elaboración de la curva de alturas generalizada para masas de *Eucalyptus globulus* se han utilizado 26.127 pares de datos de diámetro normal y altura total medidos en los IFN2 e IFN3. De ellos, 8.297 proceden de 417 parcelas medidas en el IFN2 y 17.830 de 808 parcelas medidas en el IFN3 (249 de esas parcelas fueron medidas en los dos inventarios). Los árboles están incluidos en masas puras de esta especie en las provincias de A Coruña, Lugo, Ourense y Pontevedra. Cada parcela del IFN está compuesta por 4 subparcelas circulares concéntricas de radios 5, 10, 15 y 25 m, con diámetros mínimos inventariables, que varían con el radio considerado, de 75, 125, 225 y 425 mm, respectivamente. Estas parcelas se disponen sobre los nudos de una malla de coordenadas UTM de 1 km de lado, siempre que estén pobladas por vegetación forestal.

Para el desarrollo de la función $h-d$ generalizada para *Pinus pinaster* se utilizaron datos de 20.695 árboles procedentes de tres fuentes:

- ✓ 12.513 árboles muestreados en 249 parcelas temporales o permanentes instaladas por el Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (IFIE) como parte de un ensayo de claras.
- ✓ 7.198 árboles medidos en 188 parcelas instaladas por el Centro de Investigaciones Forestales (CIF) de Lourizán con el objetivo de determinar la calidad de estación y el efecto de la fertilización sobre el crecimiento de las masas (Bará y Toval, 1983).
- ✓ 984 árboles medidos en el ensayo de claras establecido por la UXFS en 2003 en Punxín, Carballiño (Ourense), descrito en el capítulo 1 (Hernández, 2005).

La mayoría de las parcelas de las dos primeras fuentes fueron remedidas entre una y cuatro veces, mientras que los datos derivados de la última fuente provienen de un único inventario. La base de datos utilizada cubre una amplia gama de condiciones estacionales en las dos zonas que fueron definidas para *Pinus pinaster* en Galicia por Vega Alonso et al. (1993): costa e interior (ver apartado 1.3 y figura 1.13).

En el caso de *Pinus radiata*, una gran parte de los datos utilizados para el estudio de la función $h-d$ generalizada fueron recogidos en la red de 223 parcelas de investigación de la especie que la UXFS comenzó a instalar en 1995 y que mantiene en parte actualmente para elaborar modelos forestales de crecimiento (Castedo-Dorado, 2004; Castedo-Dorado et al., 2007;

Crecente-Campo, 2008), que ya se ha descrito en el capítulo 1. En total se contó con datos de 15.722 árboles, la mayoría de los cuales (14.400) procedían de la primera medición de dicha red de parcelas y de las remediciones efectuadas hasta en dos ocasiones en algunas de ellas. El resto (1.322 árboles) proceden de 12 parcelas del ensayo de claras establecido por la UXFS en 2003 en Begonte (Lugo), también descrito en el capítulo 1.

Para *Pinus sylvestris* también se utilizaron los datos de árboles medidos en la red de parcelas de investigación de la especie instalada y mantenida por la UXFS para construir modelos de crecimiento (Diéguez-Aranda, 2004). En este caso se contó con 7.602 árboles procedentes del primer inventario de 155 parcelas de dicha red y de la remediación de 68 de ellas.

Para *Pseudotsuga menziesii* se han utilizado datos de árboles medidos en la red de parcelas de investigación de la UXFS (López-Sánchez, 2009). En este caso se ha contado con 5.501 árboles procedentes del primer inventario de 110 parcelas de dicha red distribuidas por las cuatro provincias gallegas, Asturias, Burgos, Cantabria, Guipúzcoa y La Rioja (ver capítulo 1).

Finalmente, para el estudio de *Quercus robur* se utilizaron los datos de 4.821 pies procedentes de las 172 parcelas de investigación instaladas por la UXFS, en colaboración con otro grupo de investigación de la Escuela Politécnica Superior de Lugo, en masas naturales de la especie distribuidas por toda la geografía gallega (Barrio-Anta, 2003).

La base de datos utilizada cubre un amplio abanico de edades, densidades y condiciones estacionales para todas las especies estudiadas. En la tabla 7.2 se presentan los estadísticos descriptivos más importantes de la muestra de datos utilizada para cada especie, una vez realizada una depuración de datos anómalos.

Tabla 7.2. Estadísticos descriptivos de la muestra de árboles empleada para el ajuste de las relaciones altura-diámetro generalizadas.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica
<i>Eucalyptus globulus</i> (26.127 árboles)	<i>d</i>	14,0	7,5	101,9	6,5
	<i>h</i>	16,5	2,5	49,0	5,9
<i>Pinus pinaster</i> (20.695 árboles)	<i>d</i>	10,1	2,2	49,9	7,1
	<i>h</i>	10,1	2,1	27,8	3,5
<i>Pinus radiata</i> (15.722 árboles)	<i>d</i>	22,9	2,6	74,1	11,6
	<i>h</i>	16,9	3,0	39,5	6,4
<i>Pinus sylvestris</i> (7.602 árboles)	<i>d</i>	19,5	1,1	60,5	7,3
	<i>h</i>	11,7	1,6	27,3	4,6
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (5.501 árboles)	<i>d</i>	20,8	5,0	57,7	9,0
	<i>h</i>	15,7	2,5	36,0	5,9
<i>Quercus robur</i> (4.821 árboles)	<i>d</i>	22,6	5,0	71,6	9,8
	<i>h</i>	14,5	2,4	31,6	4,4

Nota: *d* = diámetro normal con corteza (cm); *h* = altura total del árbol (m).

7.3. Resultados

En la tabla 7.3 se muestra la ecuación h - d generalizada finalmente elegida para cada una de las especies estudiadas. Todas las estimaciones de los parámetros han resultado significativas al nivel del 5%. Estas ecuaciones se recogen en las publicaciones más recientes expuestas al comienzo del apartado 7.2, salvo las correspondientes a *Quercus robur* (que se ha ajustado de nuevo con el propósito de incluir variables de rodal cuyo coste de adquisición sea menor) y a *Eucalyptus globulus* (que se ha desarrollado específicamente para este libro).

Para todas las especies, excepto para *Eucalyptus globulus* y *Pinus sylvestris*, se escogió la modificación del modelo de Schnute (1981) propuesta por Castedo-Dorado et al. (2005, 2006). No obstante, en todas las ecuaciones la altura de un árbol depende de su diámetro normal y de la altura y el diámetro dominantes del rodal en el que está incluido, y sus estimaciones pasan por el punto de diámetro normal 0 y altura 1,3 m, lo que es deseable desde un punto de vista teórico. Además, todas las ecuaciones (excepto la de *Eucalyptus globulus*) son compatibles, es decir, predicen la altura dominante cuando se introduce como diámetro normal el diámetro dominante del rodal.

Tabla 7.3. Ecuaciones h - d generalizadas desarrolladas para las principales especies forestales de Galicia.

Especie	Ecuación
<i>Eucalyptus globulus</i>	$h = 1,3 + 1,098 \cdot H_0^{1,022} \cdot (1 - \exp(-1,417 \cdot d_0^{-0,9085} \cdot d))^{1,240}$
<i>Pinus pinaster</i>	$h = \left(1,3^{1,894+1,469 \cdot I} + (H_0^{1,894+1,469 \cdot I} - 1,3^{1,894+1,469 \cdot I}) \times \frac{1 - \exp(-(0,04611 - 0,04734 \cdot I) \cdot d)}{1 - \exp(-(0,04611 - 0,04734 \cdot I) \cdot d_0)} \right)^{1/(1,894+1,469 \cdot I)}$
<i>Pinus radiata</i>	$h = \left(1,3^{1,633} + (H_0^{1,633} - 1,3^{1,633}) \cdot \frac{1 - \exp(-0,02961 \cdot d)}{1 - \exp(-0,02961 \cdot d_0)} \right)^{1/1,633}$
<i>Pinus sylvestris</i>	$h = 1,3 + (H_0 - 1,3) \cdot \exp\left(7,197 \cdot \left(\frac{1}{d_0} - \frac{1}{d}\right)\right)$
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	$h = \left(1,3^{0,9967} + (H_0^{0,9967} - 1,3^{0,9967}) \cdot \frac{1 - \exp(-0,06595 \cdot d)}{1 - \exp(-0,06595 \cdot d_0)} \right)^{1/0,9967}$
<i>Quercus robur</i>	$h = \left(1,3^{1,067} + (H_0^{1,067} - 1,3^{1,067}) \cdot \frac{1 - \exp(-0,06160 \cdot d)}{1 - \exp(-0,06160 \cdot d_0)} \right)^{1/1,067}$

Nota: h = altura total del árbol (m); d = diámetro normal con corteza (cm); H_0 = altura dominante del rodal (m, ver apartado 2.1.6 y anexo I); d_0 = diámetro dominante del rodal (cm, ver anexo I); I = variable *dummy* (ficticia) que toma el valor 1 para la zona costera y 0 para la zona interior.

En la tabla 7.4 se muestran los valores de los estadísticos de bondad del ajuste (R^2 y REMC, ver anexo II) para cada una de las ecuaciones expuestas en la tabla 7.3. Como puede observarse, las funciones utilizadas se han ajustado de forma satisfactoria a los datos, explicando más del 93% de la variabilidad total de la altura para todas las especies de pino, un 84% para *Eucalyptus globulus*, un 87% para *Pseudotsuga menziesii* y un 75% para *Quercus robur*. Los errores medios sólo han sido superiores a 2 m para estas tres especies, siendo incluso inferiores a 1 m para *Pinus pinaster*. Para esta última especie los estadísticos de bondad del ajuste son comunes para las dos zonas (costera e interior), ya que el ajuste se ha realizado de forma conjunta mediante el empleo de variables *dummy*.

Tabla 7.4. Estadísticos de bondad del ajuste para las funciones *h-d* generalizadas correspondientes a las principales especies forestales con interés comercial en Galicia.

Especie	R^2	REMC (m)
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,835	2,40
<i>Pinus pinaster</i>	0,938	0,87
<i>Pinus radiata</i>	0,933	1,28
<i>Pinus sylvestris</i>	0,938	1,15
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,873	2,09
<i>Quercus robur</i>	0,753	2,20

7.4. Conclusiones y recomendaciones

Actualmente existe un conocimiento detallado de las diferentes funciones y metodologías disponibles para una correcta estimación de las alturas de los árboles individuales, bien a través de funciones *h-d* locales o generalizadas.

Se recomienda la utilización de una función *h-d* local para un rodal cuando se disponga de una muestra de alturas suficientemente grande (20-25 árboles) y bien distribuida entre las diferentes clases diamétricas. Si se cumplen estas premisas, esta metodología proporciona las estimaciones de alturas más precisas.

Si no se dispone de la muestra de alturas o ésta es demasiado pequeña, es preferible utilizar funciones *h-d* generalizadas. El importante número de datos utilizados para ajustar este tipo de funciones para seis de las especies con mayor interés comercial de Galicia, así como el elevado porcentaje de variabilidad explicada por los modelos expuestos en este trabajo, hacen que su precisión y aplicabilidad sean grandes. Además, el uso de una función *h-d* generalizada simplifica los cálculos, al no ser necesario ajustar una función individualmente para cada rodal.

Finalmente, hay que tener en cuenta que, en último término, la precisión de las estimaciones de altura dependerá de la variabilidad de las alturas dentro de una misma clase diamétrica. A su vez, esta variabilidad es función de la especie, de la diversidad genética y de la estructura del rodal. Así, por ejemplo, en una plantación clonal de eucalipto, la diferencia de alturas entre árboles

de una misma clase diamétrica será mucho menor que en una masa regular o semiregular de roble.

7.5. Ejemplo de uso de funciones $h-d$ locales y generalizadas

En el CD-ROM adjunto a este libro se incluye el archivo de Microsoft® Office Excel 2003 denominado 07_HDG.xls ("Altura-Diámetro Generalizada"), que permite aplicar de forma sencilla las funciones ajustadas en este capítulo.

Para ilustrar los cálculos que se realizan en dicho archivo, a continuación se expone un ejemplo. Para ello supóngase una parcela de 625 m² de superficie, instalada en un rodal coetáneo de *Pinus radiata*, en la que se ha medido el diámetro normal de todos los pies y la altura total de una muestra de 31 árboles elegidos aleatoriamente entre los inventariados para el diámetro, así como de los 6 árboles más gruesos de la parcela, considerados como los dominantes. En la tabla 7.5 se muestran los datos del inventario, ordenados según valores decrecientes del diámetro para facilitar la localización de los pies dominantes.

Se pretende determinar la altura de los árboles en los que ésta no se ha medido, mediante el empleo de una función $h-d$ local. Además, también se quiere determinar, utilizando una función $h-d$ generalizada, dichas alturas en el caso de que sólo se dispusiese de la altura correspondiente a los árboles dominantes.

Tabla 7.5. Datos del inventario diamétrico y de alturas de la parcela utilizada en el ejemplo.

Árbol	d	h	Árbol	d	h	Árbol	d	h	Árbol	d	h	Árbol	d	h	Árbol	d	h
1	22,6	14,1	20	18,9	--	39	16,9	--	58	15,1	12,3	77	13,8	10,8	96	12,0	--
2	21,7	12,6	21	18,9	--	40	16,8	--	59	15,0	--	78	13,7	--	97	11,5	--
3	21,7	13,9	22	18,8	--	41	16,8	--	60	15,0	--	79	13,7	11,8	98	11,3	--
4	21,5	12,9	23	18,8	--	42	16,8	--	61	14,9	9,9	80	13,5	--	99	11,0	--
5	21,4	13,5	24	18,5	--	43	16,7	12,8	62	14,9	--	81	13,5	--	100	10,4	10,5
6	21,3	13,3	25	18,3	--	44	16,5	11,8	63	14,8	--	82	13,4	12,1	101	10,2	--
7	21,1	--	26	18,1	--	45	16,4	--	64	14,8	--	83	13,3	--	102	10,0	--
8	21,0	11,7	27	17,7	--	46	16,4	--	65	14,7	--	84	13,3	10,9	103	9,8	--
9	20,9	--	28	17,6	--	47	16,3	--	66	14,7	--	85	13,2	11,0	104	9,8	--
10	20,8	12,9	29	17,6	--	48	16,3	11,5	67	14,6	--	86	13,1	--	105	9,7	--
11	20,0	11,6	30	17,5	12,6	49	16,3	11,5	68	14,5	--	87	13,0	--	106	9,5	--
12	19,5	--	31	17,5	12,7	50	16,2	12,0	69	14,5	--	88	12,8	9,8	107	9,4	--
13	19,5	--	32	17,5	13,5	51	15,9	12,0	70	14,5	--	89	12,5	9,7	108	9,3	--
14	19,3	--	33	17,4	--	52	15,7	--	71	14,1	12,3	90	12,4	--	109	9,1	--
15	19,2	11,9	34	17,4	--	53	15,5	--	72	14,0	--	91	12,4	--	110	9,0	--
16	19,2	--	35	17,3	--	54	15,5	--	73	14,0	10,4	92	12,4	--	111	8,8	9,0
17	19,2	--	36	17,1	12,5	55	15,3	--	74	13,9	--	93	12,4	--	112	7,7	--
18	19,1	--	37	17,0	--	56	15,2	12,9	75	13,9	10,9	94	12,1	--	113	7,3	--
19	19,1	--	38	17,0	--	57	15,1	--	76	13,9	--	95	12,0	--	114	6,7	--

Nota: d = diámetro normal (cm); h = altura total (m); los árboles 1 y 5, además de ser dominantes, también se han escogido aleatoriamente para el muestreo de alturas.

Para resolver este ejemplo es necesario ajustar una función que permita describir la relación local entre alturas y diámetros, así como utilizar la ecuación $h-d$ generalizada correspondiente a la especie *Pinus radiata* que se muestra en la tabla 7.3.

7.5.1. Utilización de la función $h-d$ local

Para expresar la relación entre los diámetros y las alturas de la parcela se ha usado la función [7.1], ya que se ha comprobado que, en este caso, describe adecuadamente la dispersión de los datos:

$$h = \exp(a + b/d) \quad [7.1]$$

Los otros modelos expuestos en la tabla 7.1 podrían ser posibles candidatos para realizar la selección de la mejor función $h-d$ local. Esta función se ha ajustado por la metodología de mínimos cuadrados ordinarios mediante regresión no lineal a los 35 pares de observaciones diámetro-altura disponibles (tabla 7.5). La opción de realizar el ajuste considerando todos los datos disponibles, y no sólo los correspondientes a los 31 árboles elegidos aleatoriamente para la medición de la altura, implica que la muestra esté ligeramente sesgada hacia los árboles dominantes. Este hecho, sin embargo, no se considera un inconveniente, ya que los árboles dominantes son los de mayor interés comercial y, por tanto, en los que más interesa obtener buenas estimaciones de la altura.

La expresión de la función local una vez ajustada es la siguiente:

$$\hat{h}_{local} = \exp(2,839 - 5,797/d) \quad [7.2]$$

donde \hat{h}_{local} es la altura total del árbol (m) estimada mediante la función $h-d$ local y d es el diámetro normal (cm). Esta ecuación explica un 63% de la variabilidad total de las alturas en la parcela y su error promedio (REMC) es de 0,77 m.

En la figura 7.7 se muestra la curva de alturas local superpuesta a los pares de datos diámetro-altura medidos en la parcela del ejemplo, y en la tabla 7.6 se exponen las estimaciones de la altura de los árboles en los que no se ha medido dicha variable.

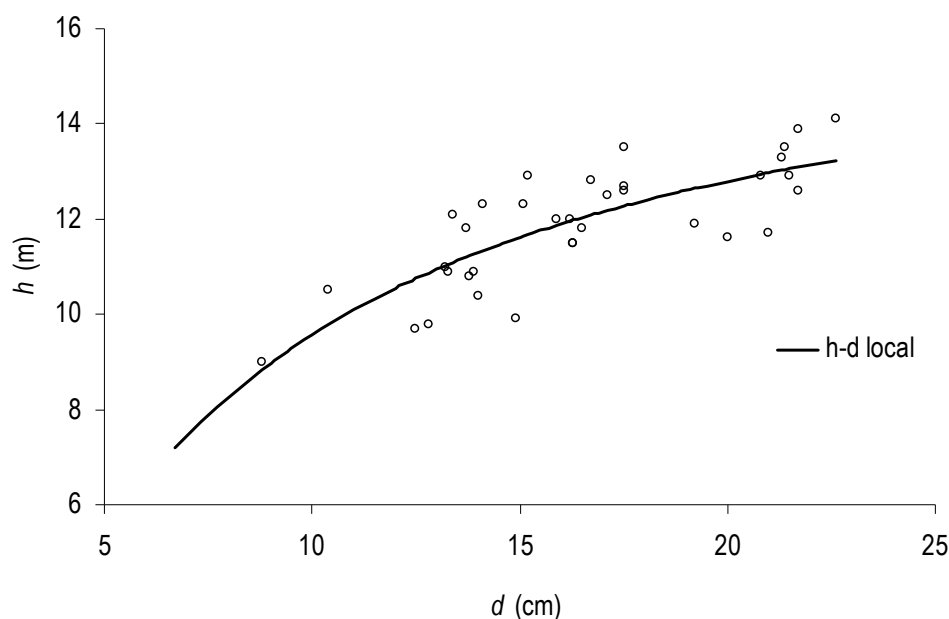


Figura 7.7. Superposición de la curva local de alturas a los pares de datos diámetro-altura medidos en la parcela del ejemplo.

7.5.2. Utilización de la función $h-d$ generalizada

Si no se hubiera medido la muestra de 31 alturas elegidas aleatoriamente sería necesario utilizar una función $h-d$ generalizada para estimar las alturas de los restantes árboles de la parcela. Debido a que la parcela ha sido instalada en un rodal puro de *Pinus radiata*, se utilizará la función $h-d$ generalizada correspondiente a esta especie expuesta en la tabla 7.3. Esa función permite predecir la altura de árboles individuales a partir de su diámetro normal y de la altura y el diámetro dominantes del rodal. Por tanto, el primer paso será calcular los valores de estas dos variables dasométricas.

Como ya se ha comentado, ambas variables se han definido como la media aritmética de las alturas y de los diámetros, respectivamente, de los 100 pies más gruesos por hectárea (ver apartado 2.1.6 y anexo I). Teniendo en cuenta que la parcela de muestreo tiene 625 m² de superficie, se ha medido la altura total en los 6 árboles más gruesos, y los valores de diámetro dominante (d_0) y altura dominante (H_0) que se han obtenido son, respectivamente, 21,7 cm y 13,4 m.

Para estimar las alturas individuales de los árboles de la parcela mediante la función $h-d$ generalizada basta con sustituir estos valores, junto con el diámetro de cada árbol, en la ecuación correspondiente a *Pinus radiata* de la tabla 7.3:

$$\hat{h}_{gen.} = \left(1,3^{1,633} + (13,4^{1,633} - 1,3^{1,633}) \cdot \frac{1 - \exp(-0,02961 \cdot d)}{1 - \exp(-0,02961 \cdot 21,7)} \right)^{1/1,633} \quad [7.3]$$

donde $\hat{h}_{gen.}$ es la altura total del árbol (m) estimada mediante la función $h-d$ generalizada y d es el diámetro normal (cm).

En la tabla 7.6 se muestran las estimaciones de las alturas para los árboles de la parcela en los que no se ha medido la altura, empleando para ello las funciones $h-d$ local y generalizada, mientras que en la figura 7.8 se muestran las curvas de alturas local y generalizada superpuestas a los pares de datos diámetro-altura medidos.

Tabla 7.6. Estimaciones de la altura de los árboles de la parcela del ejemplo en los que no se ha medido dicha variable, utilizando las funciones $h-d$ local (\hat{h}_{local}) y generalizada ($\hat{h}_{gen.}$).

Árbol	d	\hat{h}_{local}	$\hat{h}_{gen.}$	Árbol	d	\hat{h}_{local}	$\hat{h}_{gen.}$	Árbol	d	\hat{h}_{local}	$\hat{h}_{gen.}$	Árbol	d	\hat{h}_{local}	$\hat{h}_{gen.}$
7	21,1	13,0	13,2	34	17,4	12,3	12,2	64	14,8	11,6	11,3	94	12,1	10,6	10,2
9	20,9	13,0	13,2	35	17,3	12,2	12,1	65	14,7	11,5	11,2	95	12,0	10,5	10,2
12	19,5	12,7	12,8	37	17,0	12,2	12,0	66	14,7	11,5	11,2	96	12,0	10,5	10,2
13	19,5	12,7	12,8	38	17,0	12,2	12,0	67	14,6	11,5	11,2	97	11,5	10,3	10,0
14	19,3	12,7	12,7	39	16,9	12,1	12,0	68	14,5	11,5	11,2	98	11,3	10,2	9,9
16	19,2	12,6	12,7	40	16,8	12,1	12,0	69	14,5	11,5	11,2	99	11,0	10,1	9,8
17	19,2	12,6	12,7	41	16,8	12,1	12,0	70	14,5	11,5	11,2	101	10,2	9,7	9,4
18	19,1	12,6	12,7	42	16,8	12,1	12,0	72	14,0	11,3	11,0	102	10,0	9,6	9,3
19	19,1	12,6	12,7	45	16,4	12,0	11,8	74	13,9	11,3	10,9	103	9,8	9,5	9,2
20	18,9	12,6	12,6	46	16,4	12,0	11,8	76	13,9	11,3	10,9	104	9,8	9,5	9,2
21	18,9	12,6	12,6	47	16,3	12,0	11,8	78	13,7	11,2	10,9	105	9,7	9,4	9,2
22	18,8	12,6	12,6	52	15,7	11,8	11,6	80	13,5	11,1	10,8	106	9,5	9,3	9,1
23	18,8	12,6	12,6	53	15,5	11,8	11,5	81	13,5	11,1	10,8	107	9,4	9,2	9,0
24	18,5	12,5	12,5	54	15,5	11,8	11,5	83	13,3	11,1	10,7	108	9,3	9,2	9,0
25	18,3	12,5	12,4	55	15,3	11,7	11,5	86	13,1	11,0	10,6	109	9,1	9,0	8,9
26	18,1	12,4	12,4	57	15,1	11,6	11,4	87	13,0	10,9	10,6	110	9,0	9,0	8,8
27	17,7	12,3	12,2	59	15,0	11,6	11,3	90	12,4	10,7	10,4	112	7,7	8,1	8,1
28	17,6	12,3	12,2	60	15,0	11,6	11,3	91	12,4	10,7	10,4	113	7,3	7,7	7,9
29	17,6	12,3	12,2	62	14,9	11,6	11,3	92	12,4	10,7	10,4	114	6,7	7,2	7,6
33	17,4	12,3	12,2	63	14,8	11,6	11,3	93	12,4	10,7	10,4				

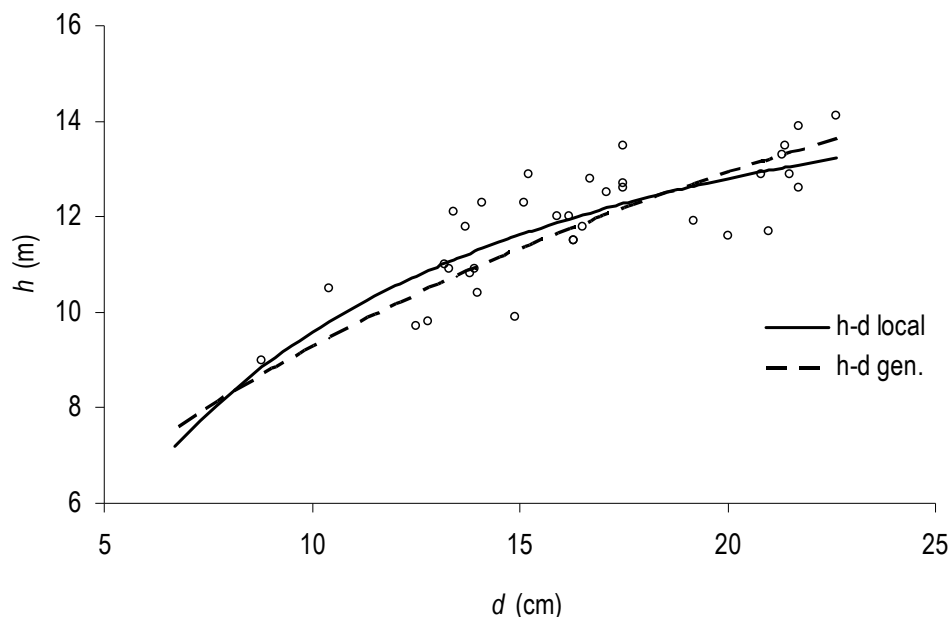


Figura 7.8. Superposición de las curvas local y generalizada de alturas a los pares de datos diámetro-altura medidos en la parcela del ejemplo.

Como se aprecia, las estimaciones obtenidas en los dos casos no son iguales, ya que las metodologías y las ecuaciones utilizadas son distintas. Como ya se ha comentado, las estimaciones más precisas se obtienen utilizando la función $h-d$ local si se cuenta con los datos adecuados (como es el caso de este ejemplo), si bien la función $h-d$ generalizada requiere un menor esfuerzo de muestreo y no tiene que ajustarse para cada rodal.

7.6. Bibliografía

- Amateis, R.L., Radtke, P.J., Burkhardt, H.E. 1995. TAUYIELD: A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned loblolly pine plantations. School of Forestry and Wildlife Resources, VPI & SU. Report nº 82.
- Arabatzis, A., Burkhardt, H. 1992. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantations. For. Sci. 38, 192-198.
- Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study. Pergamon Press, Oxford, New York.
- Bará, S., Toval, G. 1983. Calidad de estación del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia, Comunicaciones INIA nº 24, Madrid.
- Barrio-Anta, M. 2003. Crecimiento y producción de masas naturales de *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Barrio-Anta, M., Álvarez González, J.G., Díaz-Maroto, I., López-Sánchez, C. 2004. Relación altura-diámetro generalizada para *Quercus robur* L. en Galicia. Cuadernos de la SECF 18, 141-146.
- Castedo-Dorado, F. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Simulación de alternativas selvícolas con inclusión del riesgo de incendio. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

- Castedo-Dorado, F., Barrio-Anta, M., Parresol, B.R., Álvarez González, J.G. 2005. A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain). *Ann. For. Sci.* 62, 455–465.
- Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Barrio-Anta, M., Sánchez, F., Gadow, K.v. 2006. A generalized height-diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain. *For. Ecol. Manage.* 229, 202-213.
- Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G. 2007. A growth model for *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. *Ann. For. Sci.* 64, 453-465.
- Crecente-Campo, F. 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Curtis, R.O. 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. *For. Sci.* 13(4), 365-375.
- Diéguez-Aranda, U. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Diéguez-Aranda, U., Barrio-Anta, M., Castedo-Dorado, F. 2005. Relación altura-diámetro generalizada para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en el noroeste de España. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 14, 229-241.
- Fang, Z., Bailey, R.L. 1998. Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China. *For. Ecol. Manage.* 110, 315-327.
- Gadow, K.v., Real, P., Álvarez González, J.G. 2001. Modelización del Crecimiento y la evolución de bosques. IUFRO World Series vol. 12, Viena.
- Gaffrey, D. 1988. Forstamts-und bestandesindividuelles Sortimentierungsprogramm als Mittel zur Planung, Aushaltung und Simulation. Diplomarbeit Forscliche Fakultät, Univ. Göttingen.
- Hernández, J. 2005. Ensayo de claras en una masa natural de *Pinus pinaster* Ait. En el municipio de Punxín (Ourense). Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Huang, S., Titus, S.J., Wiens, D. 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Can. J. For. Res.* 22, 1297-1304.
- Laar, A.v., Akça, A. 2007. Forest Mensuration. Springer, Series Managing Forest Ecosystems, vol. 13.
- López-Sánchez, C.A. 2009. Estado selvícola y modelos de crecimiento y gestión de plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en España. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- López-Sánchez, C.A., Gorgoso, J.J., Castedo-Dorado, F., Rojo, A., Rodríguez Soalleiro, R., Álvarez González, J.G., Sánchez, F. 2003. A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). *Ann. For. Sci.* 60, 237-245.
- Mønness, E.N. 1982. Diameter distributions and height curves in even-aged stands of *Pinus sylvestris* L. *Medd. No. Inst. Skogforsk*, 36(15), 1-43.
- Páscoa, F. 1987. Estructura, crescimento e produção em povoamentos de pinheiro bravo. Um modelo de simulação. Tesis doctoral. Universidade Técnica de Lisboa.
- Peng, C. 1999. Nonlinear height-diameter models for nine boreal forest tree species in Ontario. Ministry of Natur. Resour., Ontario For. Res. Inst., OFRIRep. 155.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., Real, P. 1997. Mensura forestal. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). San José, Costa Rica.

- Schnute, J. 1981. A versatile growth model with statistically stable parameters. Can. J. Fish. Aquatic. Sci. 38, 1128-1140.
- Sloboda, V.B., Gaffrey, D., Matsumura, N. 1993. Regionale und lokale Systeme von Höhenkurven für gleichaltrige Waldbestände. Allg.Forst-u. J.-Ztg. 164, 225-228.
- Tomé, M. 1988. Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. (1ª rotação) na região centro de Portugal. Tesis doctoral. Universidade Técnica de Lisboa.
- Vega Alonso, P., Vega Alonso, G., González Rosales, M., Rodríguez San José, A. 1993. Mejora del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. I Congreso Forestal Español, 14–18 de junio de 1993, Lourizán, Pontevedra. pp. 129–134. Tomo II.
- Zhang, S., Amateis, R., Burkhart, H.E. 1997. The influence of thinning on tree height and diameter relationships in loblolly pine plantations. South. J. Appl. For. 21, 199–205.

8. Herramientas para la cubicación con clasificación de productos

8.1. Introducción

En este capítulo se presentan tarifas de cubicación con clasificación de productos específicas para Galicia de las siguientes especies: *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus robur*.

La estimación de las existencias maderables que puede proporcionar una masa forestal es una de las tareas más importantes para el gestor. En muchos casos resulta necesario conocer, además del volumen total de madera, qué parte de dicho volumen puede dirigirse a los diferentes destinos comerciales (desenrollo, aserrado, trituration, etc.). Las herramientas más habituales para realizar la clasificación por destinos de la madera son las funciones de volumen porcentual (también llamadas funciones de volumen de razón) y las funciones de perfil. Las primeras estiman el volumen de un árbol hasta un cierto diámetro o altura como un porcentaje del volumen total del mismo (Burkhart, 1977; Prodan et al., 1997), mientras que la cubicación mediante funciones de perfil se basa en el ajuste de una ecuación que defina la variación del diámetro a lo largo del tronco del árbol y, por tanto, caracterice su forma (Clutter et al., 1983; Avery y Burkhart, 2002; Kozak, 2004); la integración de la función de perfil desde el suelo hasta cualquier altura proporcionará una estimación del volumen maderable hasta dicha altura. En ambos casos, el volumen clasificado de un rodal o de un lote de árboles se obtiene por agregación del volumen clasificado de los árboles que los componen. La ventaja de estas herramientas, conocidas como tarifas de cubicación con clasificación de productos, radica en que, al clasificar la madera por destinos, permiten realizar una valoración económica de la producción de una masa mucho más exacta que la que se puede realizar con las tarifas clásicas, que sólo determinan el valor total del volumen, lo que supone un argumento más que convincente para recomendar su uso práctico.

Aunque las tarifas de cubicación con clasificación de productos construidas a partir de funciones de razón son de fácil utilización, generalmente se prefieren las desarrolladas a partir de funciones de perfil del tronco debido a que, además, permiten estimar el diámetro a cualquier altura. Las funciones de perfil proporcionan, entonces, estimaciones de:

- ✓ Diámetro en cualquier punto del tronco.
- ✓ Volumen total del tronco.
- ✓ Volumen y altura comerciales hasta cualquier diámetro límite y desde cualquier altura.
- ✓ Volúmenes de trozas de cualquier longitud y a cualquier altura desde el suelo.

8.1.1. Desarrollo de un sistema de estimación de volumen a partir de una función de perfil

Mediante una función de perfil se puede conocer el diámetro d_i (y por tanto el radio r_i) que alcanza un árbol a cualquier altura h_i desde el suelo (figura 8.1):

$$d_i = f(h_i) \Rightarrow r_i = f(h_i)/2 \quad [8.1]$$

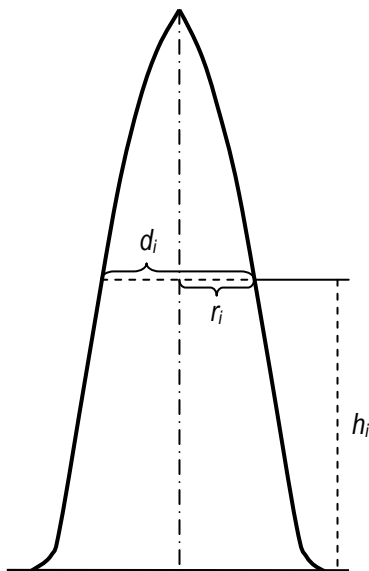


Figura 8.1. Representación de la relación entre el diámetro d_i y el radio r_i del tronco de un árbol a una cierta altura h_i medida desde el suelo.

Teniendo en cuenta la aplicación de la integral definida al cálculo del volumen de un sólido de revolución, es posible determinar por integración el volumen total del tronco, el volumen hasta una cierta altura desde el suelo y el volumen entre dos alturas cualesquiera del tronco.

El volumen dv_i de un cilindro elemental (figura a la que se asemeja una rodaja del tronco del árbol) de altura infinitesimal dh_i , se calcula como el producto de ésta por su sección s_i (figura 8.2):

$$dv_i = s_i \cdot dh_i = \pi \cdot r_i^2 \cdot dh_i = \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot dh_i = \frac{\pi}{4} \cdot f(h_i)^2 \cdot dh_i \quad [8.2]$$

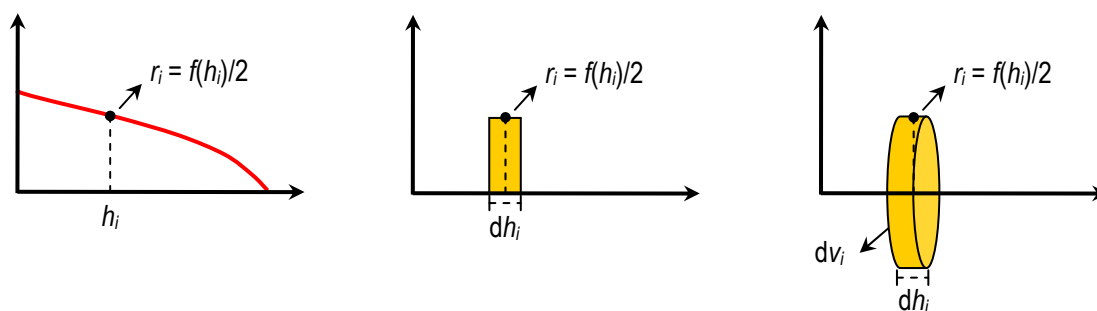


Figura 8.2. Cálculo del volumen de un cilindro elemental del tronco de un árbol a partir de una función de perfil.

El volumen total del tronco v se obtiene calculando la integral (bien sea de forma directa o mediante un procedimiento iterativo) de la ecuación [8.2] entre 0 (el nivel del suelo) y h (la altura total del árbol), como se muestra en la figura 8.3:

$$v = \int_0^h \frac{\pi}{4} \cdot f(h_i)^2 \cdot dh_i \quad [8.3]$$

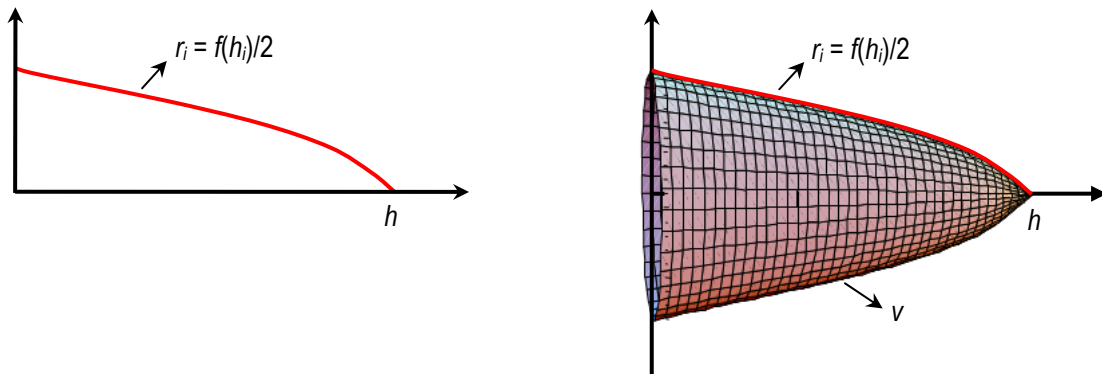


Figura 8.3. Cálculo del volumen total del tronco de un árbol a partir de una función de perfil.

El volumen v_1 hasta una cierta altura h_1 se obtiene de la misma forma que el volumen total, pero considerando como límite superior de la integral h_1 (figura 8.4):

$$v_1 = \int_0^{h_1} \frac{\pi}{4} \cdot f(h_i)^2 \cdot dh_i \quad [8.4]$$

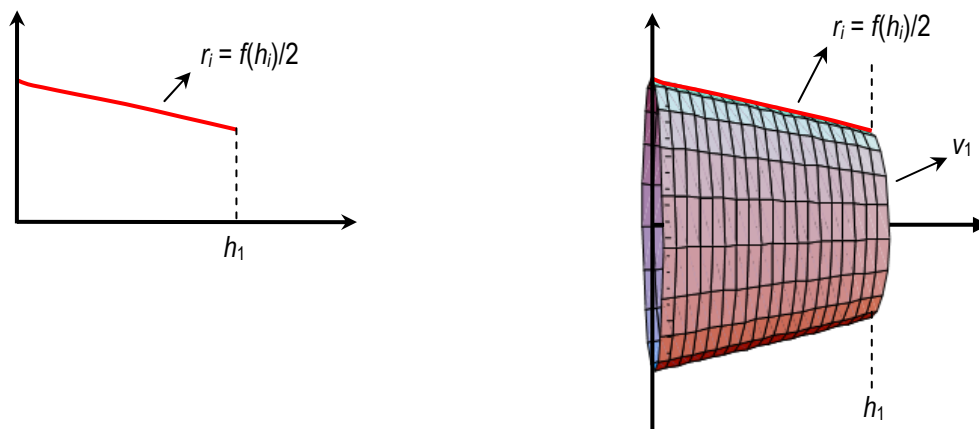


Figura 8.4. Cálculo del volumen del tronco de un árbol hasta una determinada altura a partir de una función de perfil.

Análogamente, el volumen de una troza v_{12} entre dos alturas h_1 y h_2 se determina sustituyendo dichas alturas en los límites inferior y superior de la integral, respectivamente (figura 8.5):

$$v_{12} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\pi}{4} \cdot f(h_i)^2 \cdot dh_i \quad [8.5]$$

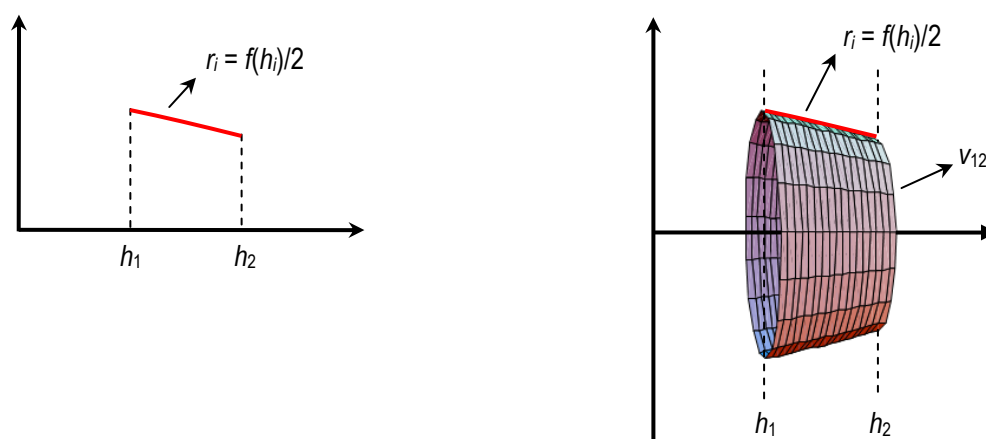


Figura 8.5. Cálculo del volumen de una troza del tronco de un árbol entre dos alturas a partir de una función de perfil.

En la práctica también es necesario conocer la altura a la que se alcanza un cierto diámetro, ya que, entre otras posibles variables (p. ej., la curvatura, las características físico-mecánicas de la madera), el diámetro menor de las trozas y su longitud determinan generalmente su destino final en la industria. Por tanto, una vez fijado un diámetro d_i , la altura h_i a la que se alcanza se puede obtener invirtiendo la función de perfil, es decir, expresando h_i en función de d_i (bien sea de forma directa o mediante algún procedimiento iterativo). Posteriormente, el valor de la altura obtenido se utiliza como límite superior o inferior de la integral según convenga. En este caso, la tarifa de cubicación con clasificación de productos se puede expresar como el conjunto de dos ecuaciones: una que proporciona la altura para un determinado diámetro, $h_i = f(d_i)$, y otra que permite calcular por integración el volumen hasta dicha altura, $d_i = f(h_i)$.

Idealmente, los sistemas de estimación de volumen deberían ser compatibles, es decir, el volumen obtenido al calcular la integral de la función de perfil entre el suelo y el ápice del árbol debería ser igual al proporcionado por una tarifa de cubicación de volumen total (Demaerschalk, 1972; Clutter, 1980). El uso de esta última es más sencillo y reduce enormemente los cálculos cuando sólo es necesario conocer el valor del volumen total sin tener en cuenta la clasificación de los productos según sus dimensiones. La forma más habitual de desarrollar sistemas de volumen compatibles es expresar el coeficiente β de la ecuación de variable combinada de Spurr (1952) sin el término independiente ($v = \beta \cdot d^2 \cdot h$, donde v es el volumen total del tronco, d el diámetro normal y h la altura total del árbol) en función de los coeficientes de la función de perfil, o viceversa, mediante la utilización de una relación de compatibilidad. De esta forma se asegura

que la función de perfil y la tarifa de cubicación son analíticamente consistentes (Sharma y Oderwald, 2001). Ejemplos de sistemas de este tipo son los desarrollados por Demaerschalk (1972), Martin (1981) y Byrne y Reed (1986). Otra metodología consiste en incluir la expresión de una tarifa de volumen total en una función de perfil, imponiendo una condición en los parámetros de la función de perfil para que la integración de ésta entre la base y el ápice del árbol proporcione el mismo volumen total que la tarifa de cubicación. Ejemplos de sistemas desarrollados mediante esta metodología son los de Goulding y Murray (1976), Fang y Bailey (1999) y Fang et al. (2000). Las tarifas de cubicación de volumen total más utilizadas para este propósito son: $v = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2}$ (introducida originalmente en forma logarítmica por Schumacher y Hall, 1933) y $v = \alpha + \beta \cdot d^2 \cdot h$ (Spurr, 1952). Con cualquiera de las dos metodologías es posible emplear tarifas de cubicación existentes que se espera continúen usándose en el futuro, aunque también se pueden utilizar nuevas tarifas de cubicación.

8.2. Material y métodos

Hasta el momento se han publicado tarifas de cubicación con clasificación de productos específicas para Galicia de las siguientes especies: *Eucalyptus globulus* (Sánchez et al., 2004), *Pinus pinaster* (Rojo et al., 2005), *Pinus radiata* (Castedo-Dorado y Álvarez González, 2000; Castedo-Dorado, 2004; Castedo-Dorado et al., 2007), *Pinus sylvestris* (Novo et al., 2003; Diéguez-Aranda, 2004; Diéguez-Aranda et al., 2006), *Pseudotsuga menziesii* (López-Sánchez, 2009) y *Quercus robur* (Barrio-Anta et al., 2004, 2007). Todas ellas se han desarrollado en el seno del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), de la Universidad de Santiago de Compostela.

Sin embargo, la adquisición de nuevos datos desde la publicación de algunas de las tarifas, los progresos en el conocimiento de las técnicas de modelización forestal durante los últimos años por los miembros del grupo de investigación y la aparición de nuevos modelos con mejores características, han hecho recomendable la búsqueda de un modelo con características óptimas que pueda adaptarse de forma satisfactoria al conjunto de especies, considerando lógicamente las particularidades de cada una de ellas.

Por esa razón, en este libro se han desarrollado nuevas tarifas de cubicación con clasificación de productos para las especies con mayor interés comercial en Galicia, basándose en una revisión en profundidad de la literatura más avanzada sobre las mejores metodologías y modelos existentes.

8.2.1. Datos

El conjunto de datos utilizado para desarrollar las tarifas de cubicación con clasificación de productos está compuesto por las mediciones realizadas por miembros de la UXFS en 1.593 árboles muestreados en rodales regulares monoespecíficos de las especies *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pseudotsuga menziesii*¹ y *Quercus robur* en Galicia, que pertenecen a la red de parcelas permanentes descrita en el capítulo 1, y también por los datos correspondientes a otros trabajos específicos sobre el tema realizados en el seno de la misma UXFS.

En el caso de *Eucalyptus globulus* se partió de un total de 200 árboles, de los cuales 44 fueron muestreados en dos rodales de la provincia de A Coruña y los otros 156 en cinco aprovechamientos de la provincia de Pontevedra. La muestra final obtenida resultó suficientemente repartida por clases diamétricas y por clases sociológicas (Ucha, 2004), aunque el número de localizaciones quizá sea demasiado reducido (faltarían, entre otros, datos de rodales de la costa de la provincia de Lugo).

Para elaborar las funciones de perfil de *Pinus pinaster* se partió de datos de 328 árboles procedentes de tres fuentes:

- ✓ 203 árboles muestreados en dos zonas de corta de la provincia de A Coruña (40 árboles), una de Lugo (32 árboles) y cinco de Pontevedra (131 árboles), donde se eligieron pies de todas las clases sociológicas y diamétricas para realizar un estudio de funciones de perfil (Perales, 2002).
- ✓ 75 árboles medidos en seis rodales de la especie, cuatro en la provincia de Lugo y dos en Pontevedra, de entre 34 y 44 años, para un estudio de biomasa (Balboa-Murias, 2005).
- ✓ 50 árboles medidos en el ensayo de claras establecido por la UXFS en 2003 en Punxín, Carballiño (Ourense), descrito en el capítulo 1 (Hernández, 2005).

Una gran parte de los datos originales utilizados para el estudio de las funciones de perfil de *Pinus radiata* fueron recogidos en las proximidades de la red de parcelas de investigación de la especie de la UXFS, cuyos detalles se han incluido en el capítulo 1 (Castedo-Dorado et al., 2007; Crecente-Campo, 2008). Como ya se comentó, cuando fue posible se midieron uno o dos árboles dominantes por parcela, fuera de éstas pero dentro de las mismas masas, obteniéndose así 164 pies. Además, para tratar de hacer más representativa la muestra se apearon otros 257 árboles tipo en claras o cortas finales a lo largo de toda la zona de distribución de la especie en Galicia. En total se contó con datos de 421 árboles, bien repartidos por toda Galicia, aunque esta muestra conjunta resultó algo sesgada en el sentido de poseer una gran proporción de pies dominantes.

¹ En el caso de *Pseudotsuga menziesii* se partió de la información recogida en 101 árboles apeados en Asturias y 30 árboles apeados en Guipúzcoa, además de la recogida en pie mediante escalada en 151 árboles en Galicia.

Para *Pinus sylvestris* también se partió de datos de árboles medidos en la red de parcelas de investigación de la especie instalada y mantenida por la UXFS (Diéguez-Aranda, 2004). En este caso también se midieron, cuando fue posible, dos árboles en las proximidades de las parcelas, alcanzando un total de 228 pies. Aunque la muestra está bien repartida por toda el área de distribución del pino silvestre en Galicia, resulta también claramente sesgada hacia árboles dominantes.

Para *Pseudotsuga menziesii* se partió igualmente de datos de árboles medidos en la red de parcelas de investigación de la especie de la UXFS (López-Sánchez, 2009). En los casos en que fue posible, se procedió a seleccionar árboles sin defectos de forma y a medir, bien mediante la técnica de escalada (en Galicia) o bien posteriormente al apeo (en Asturias y Guipúzcoa), 282 árboles repartidos proporcionalmente al número de pies de las clases sociológicas de dominantes, codominantes e intermedios. Los árboles apeados fueron seleccionados en las proximidades de las parcelas de investigación, pero dentro del mismo rodal.

Finalmente, para el estudio de *Quercus robur* se partió de la información recogida en 251 pies procedentes de 94 parcelas permanentes instaladas en rodales naturales de la especie distribuidos por toda la geografía gallega, que pertenecen a la red de la UXFS descrita en el capítulo 1 (Barrio-Anta, 2003; Barrio-Anta et al., 2004). La muestra abarca un amplio abanico de edades, calidades de estación y densidades, pero igual que en algunas de las especies anteriores, está sesgada hacia pies dominantes.

Se realizó un muestreo destructivo en todos los árboles que se apearon. Antes de cortarlos se realizaron en cada uno de ellos dos mediciones perpendiculares del diámetro normal (diámetro a 1,3 m sobre el terreno desde la parte ladera arriba del árbol, apreciando al milímetro). Una vez apeados los árboles se midió con cinta métrica la altura del tocón (desde la parte ladera arriba del árbol) y la longitud total del tronco, aproximando al centímetro. Posteriormente los troncos se dividieron en trozas de longitud comprendida entre 1 y 2,5 m, siendo en su mayoría de un metro, anotándose dicha longitud con aproximación al centímetro. En la base de cada troza se midieron con forcípula dos diámetros con corteza perpendiculares y con una regla sus respectivos espesores de corteza, aproximando al milímetro.

En la tabla 8.1 se presentan los estadísticos descriptivos más importantes de la muestra de datos finalmente utilizada para cada especie, una vez realizada la depuración de datos anómalos (6,9% del total de árboles y 7,47% del total de secciones para el conjunto de todas las especies) mediante el procedimiento sistemático propuesto por Bi (2000). Una pequeña parte de los datos atípicos fueron debidos a errores de medición o a la transcripción de las anotaciones de campo, pero la mayoría de estos datos correspondieron a secciones de medición en las que el tronco del árbol estaba deformado, debido a un crecimiento anómalo o daño causado por algún agente biótico o abiótico. Como la parte del tronco realmente aprovechable no incluye este tipo de deformaciones, estos datos extremos fueron excluidos para el ajuste de las funciones de perfil.

Tabla 8.1. Estadísticos descriptivos de la muestra de árboles finalmente empleada para desarrollar las tarifas de cubicación con clasificación de productos.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica
<i>Eucalyptus globulus</i> (165 árboles)	Nº secciones	19,4	8	34	6,0
	<i>d</i>	23,5	8,4	75,1	11,7
	<i>h</i>	26,5	11,2	55,1	8,2
	<i>h_{st}</i>	0,12	0,04	0,30	0,05
<i>Pinus pinaster</i> (317 árboles)	Nº secciones	13,8	4	27	6,0
	<i>d</i>	30,8	6,4	72,9	13,3
	<i>h</i>	18,8	6,4	31,6	5,9
	<i>h_{st}</i>	0,08	0,00	0,24	0,04
<i>Pinus radiata</i> (411 árboles)	Nº secciones	14,5	2	30	4,2
	<i>d</i>	28,4	5,1	60,0	12,7
	<i>h</i>	20,5	4,2	36,5	6,4
	<i>h_{st}</i>	0,13	0,04	0,30	0,04
<i>Pinus sylvestris</i> (224 árboles)	Nº secciones	10,7	4	21	2,9
	<i>d</i>	22,9	9,1	36,5	5,6
	<i>h</i>	10,9	4,4	20,7	3,9
	<i>h_{st}</i>	0,11	0,03	0,21	0,03
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (282 árboles)	Nº secciones	12,1	1	31	3,8
	<i>d</i>	24,6	8,0	47,7	9,0
	<i>h</i>	17,0	6,0	34,2	6,1
	<i>h_{st}</i>	0,21	0,12	0,51	0,03
<i>Quercus robur</i> (194 árboles)	Nº secciones	12,2	5	19	2,5
	<i>d</i>	28,9	8,4	67,5	9,3
	<i>h</i>	16,5	8,2	27,5	3,6
	<i>h_{st}</i>	0,19	0,04	0,30	0,07

Nota: *d* = diámetro normal (cm); *h* = altura total (m); *h_{st}* = altura del tocón (m).

8.2.2. Ecuaciones para la cubicación con clasificación de productos

Los primeros trabajos que trataron de caracterizar el perfil del tronco de los árboles mediante modelos matemáticos utilizaron funciones de perfil en las que el diámetro relativo o su cuadrado se estimaba a partir de la altura relativa mediante una única ecuación (generalmente un polinomio de grado bajo o un modelo potencial) válida para todo el tronco del árbol. La principal desventaja de estos modelos radica en que, generalmente, no son capaces de describir adecuadamente la variación del diámetro en la base del tronco (Prodan et al., 1997). Pese a ello, el cálculo de la función primitiva de estos modelos se realiza fácilmente, por lo que permiten obtener de manera sencilla tarifas con clasificación de productos.

Para intentar mejorar la caracterización del perfil del tronco de los árboles proporcionada por las funciones de perfil simples, especialmente en la región basal donde se acumula gran parte del volumen del árbol (Cao et al., 1980), se desarrollaron modelos segmentados. Generalmente se asume que el tronco de un árbol se puede asimilar a tres formas geométricas: un cono en la parte

superior, un tronco de cono o un paraboloide en la sección central, y un tronco de cono o un neiloide en la parte basal (Husch et al., 1982). El método más utilizado para describir estas formas es ajustar a cada una de ellas una función y buscar matemáticamente la manera de unir los puntos que separan los diferentes segmentos (Byrne y Reed, 1986), para lo que se imponen las condiciones de continuidad de la curva y de sus dos primeras derivadas.

Más recientemente, Kozak (1988) introdujo los modelos de exponente variable, que asumen que la forma del tronco varía continuamente a lo largo de su altura y describen el perfil mediante una única ecuación en la que el exponente varía desde la base hasta el ápice, eliminando así la necesidad de desarrollar funciones para diferentes partes del tronco. Se trata básicamente de modelos alométricos de la forma $y = k \cdot x^c$, donde x e y son respectivamente las variables independiente y dependiente, k es una constante y c es el término del exponente que describe las diferentes formas del tronco (neiloide, paraboloide, cono e intermedias entre éstas). En comparación con los modelos simples y segmentados, los modelos de exponente variable generalmente proporcionan los menores sesgos y la mayor precisión en las estimaciones de diámetros a diferentes alturas (Kozak, 1988, 2004; Newnham, 1992).

Para realizar una descripción lo más adecuada posible del perfil del tronco de las especies forestales con mayor interés comercial en Galicia se han evaluado los modelos de perfil desarrollados por Riemer et al. (1995), Muhairwe (1999), Bi (2000), Fang et al. (2000) y Kozak (2004), que han demostrado buenos resultados y una gran flexibilidad de adaptación a diferentes especies y tipos de masas (Diéguez-Aranda et al., 2006; Corral-Rivas et al., 2007). Aunque todos ellos han estimado los diámetros a diferentes alturas para las distintas especies consideradas de forma satisfactoria, el modelo segmentado de Fang et al. (2000) y el de exponente variable de Kozak (2004) se han comportado ligeramente mejor que los demás. Entre éstos, se ha optado por el modelo de Fang et al. (2000) por las ventajas de orden práctico que presenta: está compuesto por una función de perfil, una tarifa de volumen maderable y una tarifa de volumen total que son compatibles y, además, podría utilizarse con una tarifa de volumen total ya existente y seguiría siendo compatible (aunque en este caso la precisión de la función de perfil dependería obviamente de la precisión de la tarifa de volumen total utilizada).

El modelo de Fang et al. (2000) asume que el tronco de un árbol puede asimilarse a tres segmentos que representan tres formas geométricas distintas, y por tanto posee dos puntos de unión. La expresión de la función de perfil es:

$$d_i = c_1 \cdot \sqrt{H^{(k-b_1)/b_1} \cdot (1-q)^{(k-\beta)/\beta} \cdot \alpha_1^{l_1+l_2} \cdot \alpha_2^{l_2}} \quad [8.6]$$

$$\text{donde} \quad k = \pi/40.000 \quad q = h_i/h \quad \begin{cases} l_1 = 1 \text{ si } p_1 \leq q \leq p_2; 0 \text{ en caso contrario} \\ l_2 = 1 \text{ si } p_2 < q \leq 1; 0 \text{ en caso contrario} \end{cases}$$

$p_1 = h_1/h$ y $p_2 = h_2/h$ (alturas relativas desde el suelo a las que se producen los dos puntos de unión que supone el modelo, el primero próximo a la altura normal y el segundo en una posición más elevada del tronco)

$$\beta = b_1^{1-(l_1+l_2)} \cdot b_2^{l_1} \cdot b_3^{l_2} \quad \alpha_1 = (1-p_1)^{\frac{(b_2-b_1)k}{b_1 \cdot b_2}} \quad \alpha_2 = (1-p_2)^{\frac{(b_3-b_2)k}{b_2 \cdot b_3}} \quad r_0 = (1-h_{st}/h)^{k/b_1}$$

$$r_1 = (1-p_1)^{k/b_1} \quad r_2 = (1-p_2)^{k/b_2} \quad c_1 = \sqrt{\frac{a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2-k/b_1}}{b_1 \cdot (r_0-r_1) + b_2 \cdot (r_1-\alpha_1 \cdot r_2) + b_3 \cdot \alpha_1 \cdot r_2}}$$

La tarifas de volumen comercial v_i y de volumen total v se obtienen mediante integración directa de la función de perfil. Sus expresiones son las siguientes:

$$v_i = c_1^2 \cdot h^{k/b_1} \cdot (b_1 \cdot r_0 + (l_1 + l_2) \cdot (b_2 - b_1) \cdot r_1 + l_2 \cdot (b_3 - b_2) \cdot \alpha_1 \cdot r_2 - \beta \cdot (1-q)^{k/\beta} \cdot \alpha_1^{l_1+l_2} \cdot \alpha_2^{l_2}) \quad [8.7]$$

$$v = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2} \quad [8.8]$$

La notación de las variables utilizadas en el sistema compatible de Fang et al. (2000) y sus unidades son:

- d = diámetro normal con corteza (1,3 m sobre el suelo, cm).
- d_i = diámetro del tronco con corteza a la altura h_i (cm).
- h = altura total del árbol (m).
- h_i = altura sobre el nivel del suelo hasta el punto en el que el diámetro es d_i (m).
- h_{st} = altura del tocón (m).
- v = volumen del tronco con corteza (m³) desde la altura del tocón hasta el ápice del árbol.
- v_i = volumen del tronco con corteza (m³) desde la altura del tocón hasta el punto en el que el diámetro es d_i .

Los coeficientes a estimar mediante el ajuste de regresión son a_0 , a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , b_3 , p_1 y p_2 .

El desarrollo del sistema compatible de Fang et al. (2000) se basa en la ecuación [8.8], aunque ya se ha comentado que es posible utilizar cualquier otra tarifa de cubicación existente.

8.2.3. Ajuste del modelo de Fang et al. (2000)

Como ya se ha indicado, el sistema de ecuaciones compatibles de Fang et al. (2000) consta de una función de perfil, una tarifa de cubicación de volumen hasta una altura determinada y una tarifa de cubicación de volumen total (en realidad ésta es un caso especial incluido en el modelo de volumen hasta cierta altura, es decir, cuando $h_i = h$, entonces $v_i = v$). Para su ajuste existen varias posibilidades, aunque la compatibilidad entre la función de perfil y las tarifas de cubicación es independiente de la metodología de estimación de parámetros utilizada, siempre que las tres

ecuaciones tomen los mismos valores para los parámetros comunes. Las posibilidades pasan por estimar en primer lugar una de las ecuaciones y sustituir los parámetros estimados en las demás, procediendo posteriormente a ajustar los parámetros restantes, o por estimar de forma simultánea varias de las ecuaciones del sistema (p. ej., la función de perfil y la tarifa de cubicación de volumen hasta cierta altura). También existe la posibilidad de obligar al modelo a que proporcione las mismas estimaciones de volumen que una tarifa de cubicación de volumen total que ya exista y se quiera seguir utilizando, en cuyo caso es necesario fijar previamente al ajuste los parámetros de la tarifa de cubicación de volumen total en las demás ecuaciones (función de perfil y tarifa de volumen hasta cierta altura).

La selección de la alternativa de ajuste dependerá de si el uso principal del sistema será la estimación del volumen total, la estimación del volumen por destinos comerciales, la estimación de diámetros a distintas alturas o una mezcla entre estas dos últimas. También debe considerarse que los volúmenes reales generalmente no se conocen, ya que se suelen calcular por las fórmulas de Smalian¹ o Huber², que sólo dan resultados exactos para trozas de los tipos dendrométricos cilindro y paraboloides, y cubican por exceso y por defecto, respectivamente, para trozas con perfiles en forma de cono y de neiloide (Diéguez-Aranda et al., 2003). Este problema se hace más importante en las trozas basales, en las que se acumula más volumen (Husch et al., 1982). Por tal motivo, algunos autores (p. ej., Martin, 1984) indican que la información resultante de comparar el volumen obtenido mediante integración de la función de perfil y el volumen proporcionado por la fórmula de Smalian es limitada, debido a que las estimaciones de la función de perfil no se comparan con volúmenes reales, sino simplemente con segundas estimaciones. Teniendo en cuenta lo anterior, se ha decidido ajustar de forma independiente la función de perfil del sistema compatible de Fang et al. (2000), optimizándose de este modo la estimación de diámetros a distintas alturas, para luego obtener tarifas de volumen total y de volumen hasta cierta altura. Los ajustes del modelo para cada especie se han realizado mediante el procedimiento MODEL de SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004).

8.3. Resultados

En la tabla 8.2 se muestran las estimaciones de los parámetros de la función de perfil de Fang et al. (2000). Todos los parámetros han resultado significativos al nivel del 5%. En la tabla 8.3 se muestran los valores de los correspondientes estadísticos de bondad del ajuste, el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), cuyo significado y expresión pueden consultarse en el anexo II.

¹ La fórmula de Smalian proporciona el volumen de una troza como el producto de su longitud por la semisuma del área de sus secciones extremas.

² La fórmula de Huber proporciona el volumen de una troza como el producto de su longitud por el área de la sección en el medio de la troza.

Tabla 8.2. Estimaciones de los parámetros del sistema compatible de Fang et al. (2000) para las principales especies forestales con interés comercial en Galicia.

Especie	a_0	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	p_1	p_2
<i>Eucalyptus globulus</i>	$4,896 \cdot 10^{-5}$	1,679	1,186	$4,901 \cdot 10^{-6}$	$3,246 \cdot 10^{-5}$	$4,156 \cdot 10^{-5}$	0,04503	0,8364
<i>Pinus pinaster</i>	$3,974 \cdot 10^{-5}$	1,876	1,079	$1,003 \cdot 10^{-5}$	$3,695 \cdot 10^{-5}$	$2,910 \cdot 10^{-5}$	0,1013	0,7233
<i>Pinus radiata</i>	$4,851 \cdot 10^{-5}$	1,883	1,004	$8,702 \cdot 10^{-6}$	$3,302 \cdot 10^{-5}$	$2,899 \cdot 10^{-5}$	0,06526	0,6560
<i>Pinus sylvestris</i>	$6,421 \cdot 10^{-5}$	1,817	1,001	$1,357 \cdot 10^{-5}$	$3,059 \cdot 10^{-5}$	$2,699 \cdot 10^{-5}$	0,08199	0,6237
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	$8,560 \cdot 10^{-5}$	1,771	0,9510	$9,340 \cdot 10^{-6}$	$3,169 \cdot 10^{-5}$	$2,786 \cdot 10^{-5}$	0,07362	0,5397
<i>Quercus robur</i>	$4,618 \cdot 10^{-5}$	1,771	1,165	$5,159 \cdot 10^{-6}$	$3,157 \cdot 10^{-5}$	$2,553 \cdot 10^{-5}$	0,04025	0,5184

Tabla 8.3. Estadísticos de bondad del ajuste del sistema compatible de Fang et al. (2000) para las principales especies forestales con interés comercial en Galicia.

Especie	R^2	REMC (cm)
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,985	1,25
<i>Pinus pinaster</i>	0,986	1,56
<i>Pinus radiata</i>	0,989	1,31
<i>Pinus sylvestris</i>	0,987	1,10
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,988	1,11
<i>Quercus robur</i>	0,975	1,83

Como puede observarse, la función de perfil seleccionada se ha ajustado de forma satisfactoria a los datos, explicando al menos el 97,5% de la variabilidad total del diámetro a diferentes alturas para todas las especies, con errores medios inferiores o iguales a 1,83 cm.

8.4. Conclusiones y recomendaciones

Actualmente existe un conocimiento detallado de las diferentes funciones y metodologías disponibles para una correcta estimación de los diámetros a diferentes alturas y, consecuentemente, del volumen comercial o total del árbol, tal y como demuestra el elevado porcentaje de variabilidad explicada por los modelos ajustados para este libro.

Con respecto a los tipos de tarifas de cubicación con clasificación de productos, las más recomendables son las derivadas a partir de funciones de perfil que son compatibles con tarifas de cubicación de volumen total, siempre que presenten estadísticos de bondad del ajuste similares a los de las funciones de perfil no compatibles. La elección de este tipo de sistemas compatibles se basa en que, en ellos, la aplicación de una tarifa de cubicación de volumen total permite una estimación rápida del volumen de los árboles idéntico al que se obtiene por integración de una función de perfil, cuyo empleo resulta más lento y laborioso. El uso de la tarifa de cubicación de volumen total simplifica enormemente los cálculos cuando sólo se quiere conocer el valor del volumen total sin tener en cuenta la clasificación de los productos según sus dimensiones.

Por otra parte, se recomienda la recogida de nuevos datos que permitan reajustar y mejorar las tarifas existentes para Galicia, para contar con bases de datos más amplias y centradas en la realidad de las cortas de madera, debido a algunas limitaciones de los datos actualmente disponibles:

- ✓ En dos especies las tarifas ajustadas se han basado en datos que no se han recogido en toda su área de distribución. Este es el caso de *Eucalyptus globulus*, con datos procedentes de pocas localidades, y también en parte el de *Pinus pinaster*, cuyos estudios no han diferenciado entre las zonas costera e interior definidas para la especie en Galicia por Vega Alonso et al. (1993, ver apartado 1.3 y figura 1.13). Si se dispusiese de una muestra mejor representada de los datos para la elaboración de las tarifas aumentaría su capacidad estimativa, lo que permitiría que se adaptasen a un mayor rango de condiciones ambientales y de masa.
- ✓ En otros casos las tarifas desarrolladas hasta la fecha se han elaborado con una gran representación de árboles dominantes (como en las ecuaciones de *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Quercus robur*). Aunque esto no disminuye la utilidad de las tarifas, puesto que la mayor parte de los árboles de las cortas finales se pueden considerar dominantes o codominantes, también es recomendable que la recogida de nuevos datos se aproveche para mejorar la representación de árboles de otras clases sociológicas.
- ✓ Los trabajos realizados hasta ahora se centran en el estudio de árboles con fustes bien conformados, lo que puede dar lugar a estimaciones menos precisas de los volúmenes comerciales y totales si se aplican a árboles con formas de fuste diferentes. Por tal motivo, se recomienda la recogida de datos en este tipo de árboles para poder elaborar tarifas de cubicación con clasificación de productos más adecuadas a las diferentes formas de los troncos, de una manera similar a lo realizado en los Inventarios Forestales Nacionales (ICONA, 1993; DGCONA, 2002).

En resumen, se recomienda aumentar las bases de datos existentes para mejorar las tarifas de cubicación que se presentan en este libro, siguiendo las recomendaciones que se acaban de indicar. También es necesario medir más secciones en la parte basal del tronco para aumentar la precisión de las tarifas en esta zona, la más valiosa económicamente. Por último, sería deseable recoger datos del resto de especies forestales para las que no se dispone en la actualidad de tarifas de cubicación con clasificación de productos.

8.5. Ejemplo de uso de las tarifas de cubicación con clasificación de productos

En el CD-ROM adjunto a este libro se incluye el archivo 08_TCCP.xls (“Tarifas de Cubicación con Clasificación de Productos”), de Microsoft® Office Excel 2003, que automatiza el proceso de cubicación con clasificación de productos a partir de la información del diámetro normal, la altura total y la altura del tocón de un conjunto de árboles, así como de las dimensiones requeridas para diferentes destinos comerciales.

Para ilustrar los cálculos que se realizan en dicho archivo, a continuación se expone un ejemplo de cómo proceder al despiece por destinos comerciales de un árbol de la especie *Pinus sylvestris* que tiene un diámetro normal $d = 25$ cm y una altura total $h = 22$ m. Se determinará qué volumen del árbol puede ser aprovechado en función de los requerimientos de los destinos comerciales que se indican en la tabla 8.4, considerando que tras la corta del árbol se dejará en monte un tocón de altura $h_{st} = 0,1$ m. Se calculará también el volumen total del tronco del árbol y el volumen del tronco sin aprovechamiento comercial.

Tabla 8.4. Requisitos de los destinos comerciales (ejemplo).

Destino	Diámetro mínimo en punta delgada (cm)	Longitud de troza (m)
1	20	2,5
2	10	2,0

Para resolver este ejemplo es necesario utilizar las ecuaciones [8.6], [8.7] y [8.8], así como las estimaciones de los parámetros de la tabla 8.2 correspondientes a la especie *Pinus sylvestris*.

8.5.1. Volumen aprovechable para el destino 1

El primer paso para conocer el volumen que puede aprovecharse para el destino 1 es calcular el número de trozas que cumplen con los requisitos especificados para dicho destino. Para ello, una vez fijado el diámetro mínimo en punta delgada d_i de utilización, la altura h_i a la que se alcanza éste (figura 8.6) se puede obtener invirtiendo la función de perfil, es decir, expresando h_i en función de d_i (bien sea de forma directa o mediante algún procedimiento iterativo). Así, en la función de perfil ajustada para *Pinus sylvestris* (ecuación [8.6] con las correspondientes estimaciones de los parámetros de la tabla 8.2), cuya forma general es (omitiendo los parámetros del modelo) $d_i = f(h_i; d; h; h_{st})$, deben sustituirse las variables conocidas por sus valores, es decir $20 = f(h_i; 25; 22; 0,1)$.

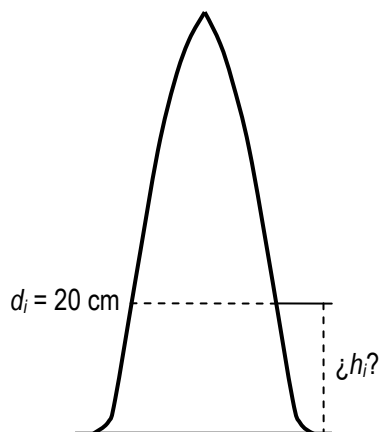


Figura 8.6. ¿A qué altura desde el suelo se alcanza un diámetro de 20 cm en el árbol del ejemplo?

Como en la ecuación [8.6] no es posible despejar h_i de forma directa, debe recurrirse a un método iterativo, por ejemplo el método de la bisección, que es el utilizado en el archivo 08_TCCP.xls. Según este método, el diámetro en punta delgada $d_i = 20 \text{ cm}$ se alcanza a una altura $h_i = 6,95 \text{ m}$ desde el suelo, por lo que considerando que la longitud de troza requerida para el destino 1 es de 2,5 m y que la altura del tocón es de 0,1 m, se pueden aprovechar para éste sólo 2 trozas ($\text{entero}((6,95-0,1)/2,5)=2$), lo que supone una longitud total para ese primer destino de 5,0 m y una altura desde el suelo de 5,1 m (2 trozas de 2,5 m + 0,1 m de altura del tocón).

Mediante la ecuación [8.7], que proporciona la parte del volumen del tronco comprendida entre la altura del tocón (en este caso 0,1 m) y una determinada altura desde el suelo (en este caso 5,1 m), se obtiene el volumen aprovechable para el destino 1: $0,248 \text{ m}^3$ (figura 8.7).

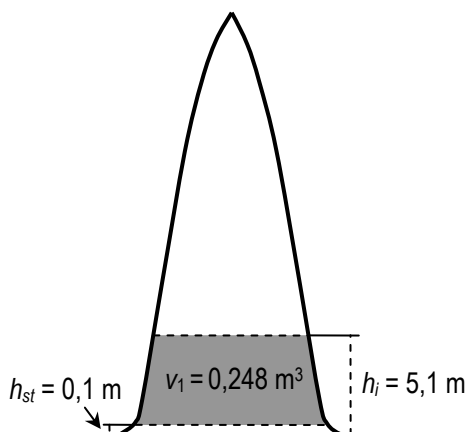


Figura 8.7. Volumen aprovechable para el destino 1 en el árbol del ejemplo.

8.5.2. Volumen aprovechable para el destino 2

Procediendo de forma similar a como se ha hecho para el destino 1, el primer paso para saber el volumen que puede aprovecharse para el destino 2 es determinar a qué altura se alcanza un diámetro en punta delgada $d_i = 10 \text{ cm}$. Invirtiendo nuevamente la función de perfil, es decir,

obteniendo el valor de h_i mediante un procedimiento iterativo a partir de la forma general de la ecuación [8.6] ($10 = f(h_i; 25; 22; 0,1)$), se obtiene una altura $h_i = 15,46$ m (figura 8.8).

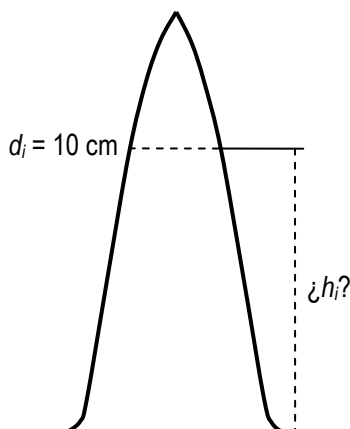


Figura 8.8. ¿A qué altura desde el suelo se alcanza un diámetro de 10 cm en el árbol del ejemplo?

Considerando que la longitud de troza requerida para el destino 2 es de 2,0 m y que para el destino 1 se habían aprovechado los primeros 5,0 m del tronco desde la altura del tocón, se pueden aprovechar para el segundo destino 5 trozas ($\text{entero}((15,46-5,0-0,1)/2,0)=5$), lo que supone una longitud total de 10,0 m y una altura desde el suelo de 15,1 m (5 trozas de 2,0 m + 5,0 m aprovechados para el destino 1 + 0,1 m de altura del tocón).

Mediante la ecuación [8.7], que proporciona la parte del volumen del tronco comprendida entre la altura del tocón (en este caso 0,1 m) y una determinada altura desde el suelo (en este caso 15,1 m), se obtiene el volumen aprovechable para los destinos 1 y 2: $0,471 \text{ m}^3$. Restando a este volumen el ya aprovechado para el destino 1 ($0,248 \text{ m}^3$) se obtiene el volumen aprovechable para el destino 2: $0,223 \text{ m}^3$ (figura 8.9).

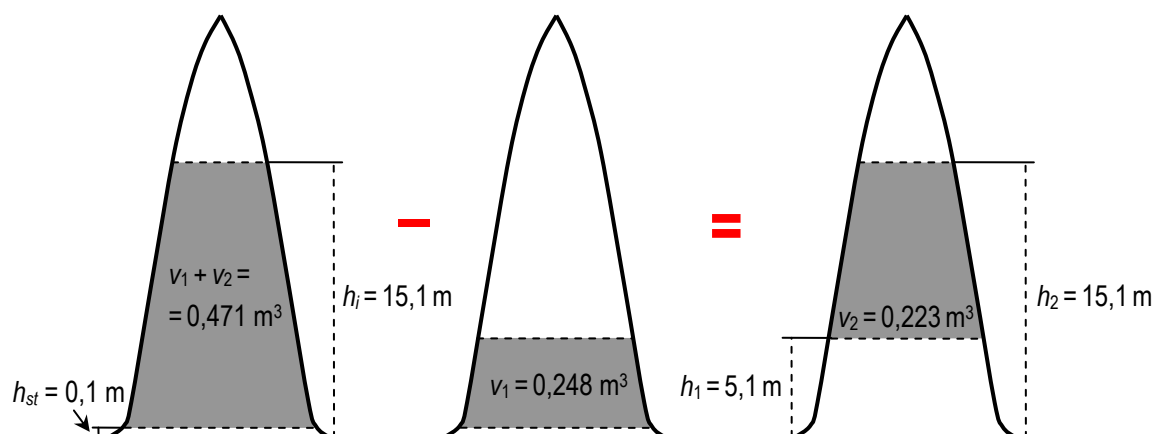


Figura 8.9. Volumen aprovechable para el destino 2 en el árbol del ejemplo.

8.5.3. Volumen total y volumen no aprovechable

El volumen total del tronco (desde la altura del tocón hasta el ápice) se calcula mediante la ecuación [8.8], utilizando como estimaciones de los parámetros los correspondientes de la tabla 8.2 para la especie *Pinus sylvestris*:

$$v = 6,421 \cdot 10^{-5} \cdot d^{1,817} \cdot h^{1,001} = 6,421 \cdot 10^{-5} \cdot 25^{1,817} \cdot 22^{1,001} = 0,491 \text{ m}^3 \quad [8.9]$$

El volumen no aprovechable del tronco del árbol es el que está por encima de la parte superior de la última troza aprovechable para el destino 2. Se obtiene como diferencia entre el volumen total y el volumen aprovechable para los destinos 1 y 2: $0,491 - 0,248 - 0,223 = 0,020 \text{ m}^3$.

Pese a que en este ejemplo se ha realizado el despiece de un único árbol, es importante indicar que las funciones de perfil, así como las tarifas de cubicación de volumen comercial y total, se deben utilizar exclusivamente para cubicar rodales o lotes de árboles y nunca para estimar el volumen de un solo árbol, ya que esto conlleva un error importante. Este error, que unas veces es por exceso y otras por defecto, se compensa cuando se suman los volúmenes de muchos árboles para estimar el volumen del rodal.

8.6. Bibliografía

- Avery, T.E., Burkhardt, H.E. 2002. Forest measurements. McGraw-Hill. 5th ed., New York.
- Balboa-Murias, M.A. 2005. Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Ait., *Eucalyptus globulus* Labill. y *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Barrio-Anta, M. 2003. Crecimiento y producción de masas naturales de *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Barrio-Anta, M., Álvarez González, J.G., Díaz-Maroto, I.J. 2004. Elaboración de una tarifa con clasificación de productos para *Quercus robur* L. en Galicia basada en un modelo de volumen porcentual. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. 13(3), 506-517.
- Barrio-Anta, M., Diéguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F., Álvarez González, J.G., Gadow, K.v. 2007. Merchantable volume system for pedunculate oak in northwestern Spain. Ann. For. Sci. 64, 511-520.
- Bi, H. 2000. Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalyptus. For. Sci. 46, 397-409.
- Burkhardt, H.E. 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. South. J. Appl. For. 1, 7-9.
- Byrne, J., Reed, D. 1986. Complex compatible taper and volume estimation systems for red and loblolly pine. For. Sci. 32, 423-443.
- Cao, Q.V., Burkhardt, H.E., Max, T.A. 1980. Evaluations of two methods for cubic-foot volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. For. Sci. 26, 71-80.
- Castedo-Dorado, F. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Simulación de alternativas selvícolas con inclusión del riesgo de incendio. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

- Castedo-Dorado, F., Álvarez González, J.G. 2000. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. Invest. Agr.: Sist. Recur. For. 9, 253-268.
- Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G. 2007. A growth model for *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. Ann. For. Sci. 64, 453-465.
- Clutter, J.L. 1980. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. For. Sci. 26, 117-120.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H., Bailey, R.L. 1983. Timber management: a quantitative approach. Krieger Publishing Company, New York.
- Corral-Rivas, J.J., Diéguez-Aranda, U., Corral Rivas, S., Castedo-Dorado, F. 2007. A merchantable volume system for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). For. Ecol. Manage. 238, 118-129.
- Crecente-Campo, F. 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Demaerschalk, J. 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. For. Sci. 18, 241-245.
- DGCONA 2002. Tercer Inventario Forestal Nacional, 1997-2006: Galicia. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Diéguez-Aranda, U. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Diéguez-Aranda, U., Barrio-Anta, M., Castedo-Dorado, F., Ruiz González, A.D., Álvarez-Taboada, M.F., Álvarez González, J.G., Rojo, A. 2003. Dendrometría. Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Diéguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F., Álvarez González, J.G., Rojo, A. 2006. Compatible taper function for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in northwestern Spain. Can. J. For. Res. 36, 1190-1205.
- Fang, Z., Bailey, R.L. 1999. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. For. Sci. 45, 85-100.
- Fang, Z., Borders, B.E., Bailey, R.L. 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. For. Sci. 46, 1-12.
- Goulding, C.J., Murray, J. 1976. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. N. Z. J. For. Sci. 5, 313-322.
- Hernández, J. 2005. Ensayo de claras en una masa natural de *Pinus pinaster* Ait. en el municipio de Punxín (Ourense). Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Husch, B., Miller, C.I., Beers, T.W. 1982. Forest mensuration. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- ICONA 1993. Segundo Inventario Forestal Nacional. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Kozak, A. 1998. Effects of upper stem measurements on the predictive ability of a variable-exponent taper equation. Can. J. For. Res. 28, 1078-1083.
- Kozak, A. 2004. My last words on taper equations. For. Chron. 80, 507-515.
- López-Sánchez, C.A. 2009. Estado selvícola y modelos de crecimiento y gestión de plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en España. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Martin, A.J. 1981. Taper and volume equations for selected Appalachian hardwood species. USDA Forest Service, Res. Pap. NE-490.

- Martin, A.J. 1984. Testing volume equation accuracy with water displacement techniques. *For. Sci.* 30, 41-50.
- Muhairwe, C.K. 1999. Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus grandis* for the north coast in New South Wales, Australia. *For. Ecol. Manage.* 113, 251-269.
- Newnham, R. 1992. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. *Can. J. For. Res.* 22, 210-223.
- Novo, N., Rojo, A., Álvarez González, J.G. 2003. Funciones de perfil del tronco y tarifas de cubicación con clasificación de productos para *Pinus sylvestris* L. en Galicia. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* 12, 123-136.
- Perales, X. 2002. Análisis de funciones de perfil de tronco y construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., Real, P. 1997. Mensura forestal. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). San José, Costa Rica.
- Riemer, T., Gadow, K.v., Sloboda, B. 1995. Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. *Allg. Forst-u. J.- Ztg.* 166, 144-147.
- Rojo, A., Perales, X., Sánchez, F., Álvarez González, J.G., Gadow, K.v. 2005. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). *Eur. J. For. Res.* 124, 177-186.
- Sánchez, F., Ucha, P., Rojo, A. 2004. Stem taper functions and volume equations with product classification for *Eucalyptus globulus* Labill. in Galicia (NW Spain). International IUFRO 4.04.06 Meeting. The Economics and Management of High Productivity Plantations. Lugo, 27-30 septiembre 2004.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/ETS® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schumacher, F.X., Hall, F.D.S. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *J. Agric. Res.* 47, 719-734.
- Sharma, M., Oderwald, R.G. 2001. Dimensionally compatible volume and taper equations. *Can. J. For. Res.* 31, 797-803.
- Spurr, S.H. 1952. Forest inventory. The Ronald Press Co., New York.
- Ucha, P. 2004. Análisis de funciones de perfil de tronco y construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Eucalyptus globulus* Labill. en Galicia. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Vega Alonso, P., Vega Alonso, G., González Rosales, M., Rodríguez San José, A. 1993. Mejora del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. I Congreso Forestal Español, 14–18 de junio de 1993, Lourizán, Pontevedra. pp. 129–134. Tomo II.

9. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón

9.1. Introducción

En ocasiones, cuando un árbol ha sido cortado y sólo permanece el tocón como indicador de sus dimensiones, es necesario utilizar el diámetro de éste para predecir el diámetro normal o, incluso, el volumen del tronco. Conocer el diámetro normal o el volumen del árbol a partir del diámetro del tocón tiene, entre otras, las siguientes aplicaciones (Bylin, 1982a; Parresol, 1998; Diéguez-Aranda et al., 2003):

- ✓ Estimar el volumen de madera extraído en una corta final o en una corta de mejora (clareo o clara) ya realizada.
- ✓ Comprobar los resultados de las operaciones de aprovechamiento tras la extracción de los árboles.
- ✓ Evaluar el volumen de madera extraído ilícitamente en un lote previamente marcado para la corta o en otros casos.
- ✓ Evaluar las prácticas selvícolas realizadas reconstruyendo la composición previa del rodal cuando éste no se ha medido antes.
- ✓ Evaluar daños producidos por condiciones ambientales adversas (nieve, fuego, viento).

En la literatura disponible sobre la predicción del volumen del árbol en función de las dimensiones del tocón, la mayoría de los trabajos elaboran tablas, gráficos o ecuaciones que predicen el diámetro normal, en vez del volumen, a partir del diámetro del tocón (McClure, 1968; Bylin, 1982a; Parresol, 1993; Khatry Chhetri y Fowler, 1996; Weigel y Johnson, 1997). En estos casos la estimación del volumen suele realizarse en dos fases: primero se predice el diámetro normal en función del diámetro del tocón y a continuación se obtiene el volumen del árbol utilizando una tarifa de cubicación local (Bylin, 1982b). Pero existen casos en los que no se dispone de una tarifa de cubicación o no se puede elaborar (p. ej., en una corta a hecho de un rodal aislado), por lo que es necesario utilizar una herramienta más general que permita la estimación directa del volumen a partir del diámetro del tocón. Así, Nyland (1975), Bylin (1982b) y Parresol (1998) han relacionado esta última variable con el volumen del tronco del árbol, y Myers (1963), Diéguez-Aranda et al. (2003) y Corral-Rivas et al. (2007) han hecho lo mismo y además han desarrollado ecuaciones diámetro normal-diámetro del tocón, para cubrir todas las posibles situaciones. A excepción del trabajo de Diéguez-Aranda et al. (2003), todos los estudios citados han trabajado con datos de diferentes especies forestales de Norteamérica.

Hasta el momento se han publicado ecuaciones específicas para Galicia que relacionan el diámetro normal y el volumen del tronco de un árbol con las dimensiones de su tocón para las siguientes especies: *Betula alba*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Quercus robur* (Diéguez-Aranda et al., 2003). En este capítulo se presentan nuevas tarifas para todas las especies excepto para *Betula alba*, para la que se muestra la tarifa desarrollada en dicho trabajo.



Figura 9.1. Tocón tras una clara en un rodal de *Pinus sylvestris*.

9.2. Material y métodos

9.2.1. Datos

El conjunto de datos utilizado para ajustar las nuevas tarifas está compuesto por las mediciones realizadas por miembros del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS) en 1.232 árboles muestreados en rodales regulares monoespecíficos de las especies indicadas en Galicia, que pertenecen a la red de parcelas permanentes descrita en el capítulo 1, y también a otros trabajos sobre desarrollo de funciones de perfil de tronco realizados en el seno del mismo grupo de investigación. Los datos empleados para cada especie coinciden prácticamente en su totalidad con los que se han descrito en el capítulo 8, de los que se han

eliminado aquellos correspondientes a los árboles para los que no se disponía de datos del tronco completo (desde el tocón hasta el ápice).

Como ya se indicó en el capítulo 8, en todos los casos los árboles se muestrearon por procedimientos destructivos. Antes de cortarlos se realizaron en cada uno de ellos dos mediciones perpendiculares del diámetro normal (diámetro a 1,3 m sobre el terreno desde la parte ladera arriba del árbol, apreciando al milímetro). Una vez apeados los árboles se midió con cinta métrica la altura del tocón (desde la parte ladera arriba del árbol) y la longitud total del tronco, aproximando al centímetro. También se midió el diámetro del tocón con corteza (considerado como tal el diámetro del extremo superior de la parte del tronco que permanece en pie tras la corta) en dos direcciones perpendiculares, aproximando al milímetro. Posteriormente los troncos se dividieron en trozas de longitud comprendida entre 1 y 2,5 m, siendo en su mayoría de un metro, anotándose dicha longitud con aproximación al centímetro. En la base de cada troza se midieron con forcípula dos diámetros con corteza perpendiculares, aproximando al milímetro. El volumen de las trozas se calculó por la fórmula de Smalian (ver capítulo 8). El raberón se cubió como un cono. El volumen total del tronco de cada árbol se obtuvo sumando los respectivos volúmenes de las trozas y el raberón.

En la tabla 9.1 se presentan los estadísticos descriptivos más importantes de la muestra utilizada para cada especie (excepto para *Betula alba*) en el ajuste de las ecuaciones de diámetro normal y volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón.

En el caso de *Betula alba*, cuyas ecuaciones se han recogido directamente del trabajo de Diéguez-Aranda et al. (2003), los valores mínimo y máximo del diámetro del tocón d_{st} fueron 14,8 y 44,5 cm, mientras que los correspondientes valores mínimo y máximo de la altura del tocón h_{st} fueron 0,01 y 0,50 m.

En las figuras 9.2 y 9.3 se muestran respectivamente los gráficos de diámetro normal y volumen del tronco frente a diámetro del tocón.

9.2.2. Modelos analizados y metodologías de ajuste

Tras el análisis de la nube de puntos de la relación entre el diámetro del tocón d_{st} y el diámetro normal d (figura 9.2) se ha decidido ajustar un modelo lineal simple (recta, ecuación [9.1]) para relacionar ambas variables y para todas las especies:

$$d = b_0 + b_1 \cdot d_{st} \quad [9.1]$$

Por su parte, la observación de la nube de puntos de la relación entre el diámetro del tocón d_{st} y el volumen del tronco v (figura 9.3) ha revelado que es necesario emplear un modelo capaz de adaptarse a la curvatura presente en los datos para todas las especies. Para ello se han analizado un modelo alométrico (ecuación [9.2]) y una parábola completa (ecuación [9.3]):

$$v = b_0 \cdot d_{st}^{b_1} \quad [9.2]$$

$$v = b_0 + b_1 \cdot d_{st} + b_2 \cdot d_{st}^2 \quad [9.3]$$

Tabla 9.1. Estadísticos descriptivos de la muestra de árboles empleada para estimar el diámetro normal y el volumen del tronco en función de las dimensiones del tocón.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica
<i>Eucalyptus globulus</i> (162 árboles)	d	23,5	8,5	75,1	11,7
	h	26,5	11,2	55,1	8,2
	d_{st}	30,5	10,9	95,7	14,6
	h_{st}	0,12	0,04	0,30	0,05
	v	0,720	0,038	7,411	1,041
<i>Pinus pinaster</i> (242 árboles)	d	30,7	6,5	72,9	14,6
	h	18,7	6,4	31,6	6,5
	d_{st}	38,6	8,7	91,7	17,8
	h_{st}	0,08	0,00	0,24	0,04
	v	0,853	0,015	3,964	0,812
<i>Pinus radiata</i> (411 árboles)	d	28,4	5,1	60,0	12,7
	h	20,5	4,2	36,5	6,4
	d_{st}	34,8	5,9	81,0	14,8
	h_{st}	0,13	0,04	0,30	0,04
	v	0,770	0,006	3,562	0,773
<i>Pinus sylvestris</i> (223 árboles)	d	22,9	9,1	36,5	5,6
	h	10,9	4,4	20,7	3,9
	d_{st}	28,3	11,2	44,1	6,2
	h_{st}	0,11	0,03	0,21	0,03
	v	0,249	0,016	0,821	0,180
<i>Quercus robur</i> (194 árboles)	d	28,9	8,4	67,5	9,3
	h	16,5	8,2	27,5	3,6
	d_{st}	36,6	10,3	83,5	11,4
	h_{st}	0,19	0,04	0,30	0,07
	v	0,574	0,027	3,230	0,491

Nota: d = diámetro normal con corteza (1,3 m sobre el suelo, cm); h = altura total del árbol (m); d_{st} = diámetro del tocón con corteza (cm); h_{st} = altura del tocón (m); v = volumen del tronco con corteza (desde la altura del tocón hasta el ápice, m³).

La recta y la parábola se han ajustado mediante el método de mínimos cuadrados con el procedimiento REG del programa SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004). El modelo alométrico se ha ajustado por mínimos cuadrados empleando el procedimiento NLIN del mismo programa, usando el método iterativo de Gauss-Newton.

El análisis de los gráficos de residuos studentizados frente a valores estimados ha mostrado problemas de heterocedasticidad (varianza no constante de los residuos). Este problema se ha corregido utilizando regresión ponderada, con un peso igual a la inversa de la varianza de cada observación. Dicha varianza σ_i^2 , que es desconocida, se ha estimado utilizando una función potencial: $\sigma_i^2 = \gamma \cdot d_{st}^k$. Los valores de γ y del exponente k se han optimizado empleando la

metodología propuesta por Harvey (1976), que consiste en emplear los errores del modelo ajustado sin pesos como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error. Finalmente, el peso considerado ha sido $1/d_{st}^k$.

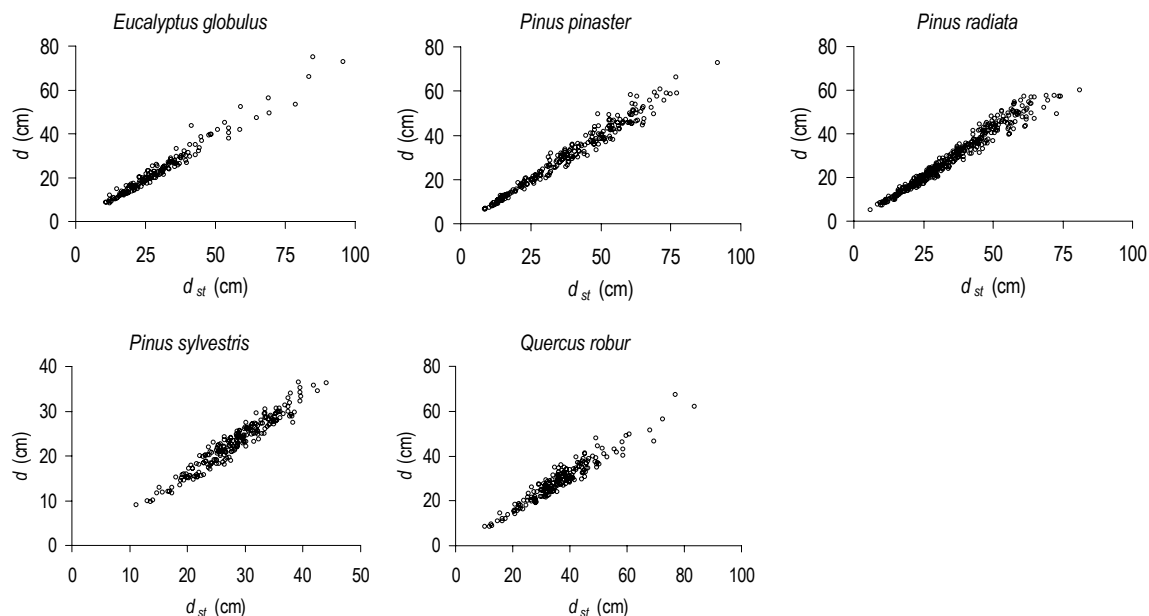


Figura 9.2. Relación entre el diámetro normal d y el diámetro del tocón d_{st} .

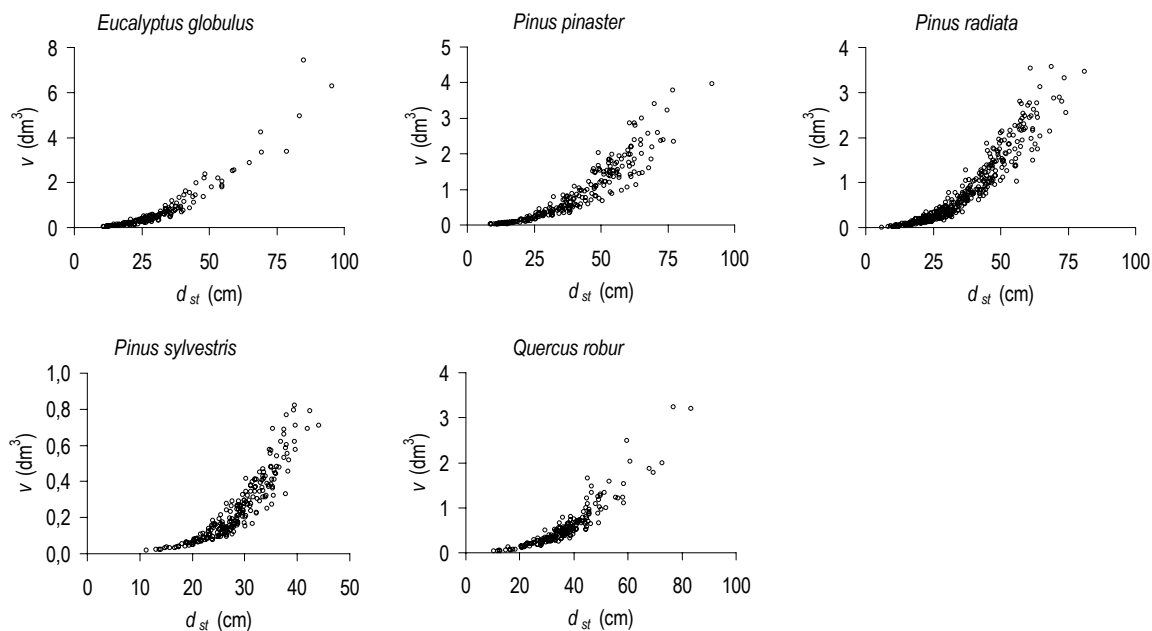


Figura 9.3. Relación entre el volumen del tronco v y el diámetro del tocón d_{st} .

9.3. Resultados

En la tabla 9.2 se muestran las estimaciones de los parámetros de los modelos ajustados para todas las especies menos para *Betula alba*. Todos los parámetros han resultado significativos al nivel del 5%.

Tabla 9.2. Estimaciones de los parámetros de los modelos ajustados para estimar el diámetro normal y el volumen del tronco en función de las dimensiones del tocón (ver notación de variables y unidades en la tabla 9.1).

Especie	<i>d</i> (recta)		<i>v</i> (alométrico)		<i>v</i> (parábola)		
	<i>b</i> ₀	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₀	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₀	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂
<i>Eucalyptus globulus</i>	-0,1682	0,7764	1,281·10 ⁻⁴	2,424	0,1008	-0,01578	9,667·10 ⁻⁴
<i>Pinus pinaster</i>	-0,7337	0,8170	1,030·10 ⁻⁴	2,388	0,04874	-0,009301	6,464·10 ⁻⁴
<i>Pinus radiata</i>	-0,7119	0,8360	7,082·10 ⁻⁵	2,533	0,07469	-0,01356	8,180·10 ⁻⁴
<i>Pinus sylvestris</i>	-1,766	0,8733	3,155·10 ⁻⁶	3,321	0,1572	-0,02138	8,275·10 ⁻⁴
<i>Quercus robur</i>	-0,4094	0,8011	9,920·10 ⁻⁵	2,363	0,06529	-0,009076	5,695·10 ⁻⁴

En la tabla 9.3 se muestran los correspondientes estadísticos de bondad del ajuste: el coeficiente de determinación (*R*²) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), cuyo significado y expresión matemática se pueden consultar en el anexo II.

Tabla 9.3. Estadísticos de bondad del ajuste de los modelos analizados para estimar el diámetro normal y el volumen del tronco en función de las dimensiones del tocón (ver notación de variables y unidades en la tabla 9.1).

Especie	<i>d</i> (recta)		<i>v</i> (alométrico)		<i>v</i> (parábola)	
	<i>R</i> ²	REMC (cm)	<i>R</i> ²	REMC (m ³)	<i>R</i> ²	REMC (m ³)
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,963	2,24	0,925	0,287	0,937	0,262
<i>Pinus pinaster</i>	0,970	2,53	0,878	0,284	0,885	0,277
<i>Pinus radiata</i>	0,965	2,40	0,897	0,249	0,911	0,231
<i>Pinus sylvestris</i>	0,934	1,43	0,875	0,0636	0,875	0,0639
<i>Quercus robur</i>	0,917	2,68	0,880	0,171	0,882	0,169

Como puede observarse, la recta ha explicado más del 91,7% de la variabilidad total del diámetro normal para todas las especies, con errores medios inferiores a 2,68 cm. Por su parte, en la estimación del volumen del tronco la parábola ha proporcionado mejores resultados (REMC menor) que el modelo alométrico para todas las especies salvo para *Pinus sylvestris*. En todos los casos se ha conseguido explicar más del 87,5% de la varianza total del volumen del tronco, con errores medios inferiores o iguales a 0,277 m³.

Una relación lineal sencilla entre el diámetro normal y el diámetro del tocón es suficiente para explicar la mayor parte de la variabilidad de los datos en casi todas las especies estudiadas, siempre que se trabaje dentro del rango de datos de diámetro y altura del tocón que se indican en la tabla 9.1. Sin embargo, en el caso de *Betula alba* parece recomendable incluir también como

variable predictora la altura del tocón h_{st} , a la vista de los resultados obtenidos por Diéguez-Aranda et al. (2003). La explicación a este hecho puede encontrarse en que el tronco de dicha especie presenta frecuentemente una sección basal con acanaladuras, lo que motiva que se aleje de la sección circular ideal (Villarino, 1983), por lo que la inclusión de la altura del tocón en este caso sí ayuda de forma significativa a explicar la variabilidad del diámetro normal (ecuación [9.4], Diéguez-Aranda et al., 2003):

$$d = 1,004 \cdot \exp(0,1275) \cdot d_{st}^{0,9477} \cdot h_{st}^{0,1272} \quad [9.4]$$

La correspondiente ecuación de volumen para *Betula alba*, también desarrollada por Diéguez-Aranda et al. (2003), incluye, por la misma razón comentada, la altura del tocón como variable predictora (ecuación [9.5]):

$$v = -0,1194 + 3,720 \cdot 10^{-4} \cdot d_{st}^2 + 0,3476 \cdot h_{st} \quad [9.5]$$

En ambas ecuaciones la notación de las variables y las unidades se corresponden con las indicadas en la tabla 9.1.

9.4. Conclusiones y recomendaciones

La relación entre el diámetro normal y el diámetro del tocón se explica adecuadamente con un modelo lineal simple (para todas las especies excepto para *Betula alba*), sin necesidad de utilizar modelos más complejos. En el caso de la relación entre el volumen del tronco y el diámetro del tocón es necesario utilizar una parábola o un modelo alométrico.

Los modelos de estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir del diámetro del tocón explican un alto porcentaje de variabilidad, por lo que para las especies estudiadas y en rangos de valores similares a los de este trabajo no se recomienda la inclusión de la altura del tocón como variable predictora. Sólo en el caso de *Betula alba*, que habitualmente presenta particularidades en la base del tronco, es conveniente considerar dicha variable.

En general, las tarifas de cubicación en función de las dimensiones del tocón deberían construirse para cada rodal (o para rodales muy similares), ya que el volumen en rodales regulares depende también en gran medida de la altura de los árboles, y la relación entre ésta y el diámetro normal varía con distintas variables del rodal, como la calidad de la estación, la edad o la densidad. Por tanto, sería interesante en estos casos hacer acopio de datos en zonas concretas para construir ecuaciones locales de este tipo, tomando datos de árboles en pie y considerando como altura del tocón la altura previsible de corta. No obstante, las relaciones que se presentan en este capítulo, aunque son de ámbito general, se han ajustado bien a los datos y, en ausencia de otra información, proporcionan estimaciones razonables del volumen del tronco. De hecho,

para todas las especies se consigue explicar más del 87,5% de la variabilidad total del volumen, tal y como muestra el coeficiente de determinación (tabla 9.3).

Por último, no se deben olvidar ciertas limitaciones de estas ecuaciones, ya que únicamente pueden aplicarse a árboles no trasmochados y de dimensiones dentro de los límites de utilización de las mismas, definidos por los valores máximo y mínimo de las variables independientes empleadas en el ajuste de los modelos (tabla 9.1), pues en caso contrario pueden dar lugar a estimaciones erróneas.

9.5. Ejemplo de estimación del volumen a partir de las dimensiones del tocón

En el CD-ROM adjunto a este libro se incluye un archivo de Microsoft® Office Excel 2003, denominado 09_TOC.xls ("Tocón"), que automatiza el proceso de estimación del diámetro normal y de cubicación a partir de la información del diámetro del tocón de un conjunto de árboles.

Para ilustrar los cálculos que se realizan en dicho archivo, a continuación se expone un ejemplo de aplicación de las ecuaciones que se presentan en este capítulo. Supóngase para ello que la empresa encargada de realizar una clara en un rodal de *Pinus pinaster* ha extraído más árboles de los que debía. Para conocer el volumen de los árboles extraídos de forma fraudulenta se puede proceder de dos maneras:

- ✓ Medir el diámetro del tocón de todos esos árboles y estimar su volumen directamente mediante las ecuaciones de una entrada que se presentan en este capítulo.
- ✓ Medir el diámetro normal y la altura total en una muestra de los árboles que permanecen en pie tras la corta, y ajustar a partir de esos datos una tarifa de cubicación de una entrada que estime el volumen de los árboles en función de su diámetro. A continuación, medir el diámetro del tocón de todos los árboles cortados y estimar el diámetro normal de los mismos mediante las ecuaciones que se presentan en este capítulo, con cuyos valores se debe, finalmente, aplicar la tarifa de cubicación ajustada.

El primer procedimiento es más sencillo y económico (sólo requiere medir el diámetro del tocón de los árboles cortados ilegalmente), pero proporciona estimaciones peores del volumen de los árboles, ya que las ecuaciones que relacionan el diámetro del tocón con el volumen del tronco que se presentan en este capítulo no tienen en cuenta que la relación entre la altura y el diámetro normal de un rodal regular de una determinada especie varía con la calidad de estación, la edad del rodal y la densidad. El segundo procedimiento es más preciso, pero requiere la medición de más variables en un número mayor de árboles y la realización de un ajuste de regresión. A continuación se van a ejemplificar los dos procedimientos.

9.5.1. Estimación del volumen del tronco directamente a partir del diámetro del tocón

Para conocer el volumen de los árboles extraídos de forma fraudulenta se ha medido el diámetro del tocón de todos ellos, figurando los datos en la tabla 9.4.

Tabla 9.4. Datos de diámetro del tocón d_{st} (cm) de los árboles extraídos de forma fraudulenta en el ejemplo.

Árbol	d_{st}	Árbol	d_{st}	Árbol	d_{st}	Árbol	d_{st}
1	25,6	7	24,8	13	15,8	19	39,8
2	22,1	8	32,5	14	18,7	20	36,1
3	33,1	9	34,6	15	26,7	21	42,5
4	26,3	10	27,9	16	30,8	22	28,5
5	13,6	11	21,3	17	23,5	23	27,9
6	21,5	12	15,9	18	39,7	24	12,7

Como sólo se dispone de esta información basta con estimar el volumen del tronco de cada uno de los árboles extraídos de forma ilícita a partir del diámetro de su tocón, empleando para ello el modelo desarrollado para la especie *Pinus pinaster* (en este caso la parábola, ecuación [9.3], por presentar un menor valor del estadístico REMC que el modelo alométrico), con las correspondientes estimaciones de los parámetros de la tabla 9.2:

$$v = 0,04874 - 0,009301 \cdot d_{st} + 6,464 \cdot 10^{-4} \cdot d_{st}^2 \quad [9.6]$$

Aplicando la ecuación [9.6] a los datos de la tabla 9.4 se obtienen los resultados que se exponen en la tabla 9.5.

Tabla 9.5. Estimación del volumen del tronco \hat{v} (m³) de los árboles extraídos de forma fraudulenta en el ejemplo a partir del diámetro de su tocón d_{st} (cm).

Árbol	d_{st}	\hat{v}	Árbol	d_{st}	\hat{v}	Árbol	d_{st}	\hat{v}	Árbol	d_{st}	\hat{v}
1	25,6	0,234	7	24,8	0,216	13	15,8	0,063	19	39,8	0,702
2	22,1	0,159	8	32,5	0,429	14	18,7	0,101	20	36,1	0,555
3	33,1	0,449	9	34,6	0,501	15	26,7	0,261	21	42,5	0,821
4	26,3	0,251	10	27,9	0,292	16	30,8	0,375	22	28,5	0,309
5	13,6	0,042	11	21,3	0,144	17	23,5	0,187	23	27,9	0,292
6	21,5	0,148	12	15,9	0,064	18	39,7	0,698	24	12,7	0,035

El volumen total extraído de forma fraudulenta, según este procedimiento, se calcula sumando los volúmenes estimados para cada uno de los árboles cortados ilegalmente (tabla 9.5), resultando un valor de 7,33 m³.

9.5.2. Estimación del volumen del tronco a partir del diámetro del tocón empleando una tarifa de cubicación de una entrada ajustada específicamente para el rodal

En este procedimiento es necesario medir el diámetro normal d y la altura h en una muestra de 20-25 árboles que permanezcan en pie tras la realización de la clara (tabla 9.6), que pueden seleccionarse mediante alguno de los procedimientos indicados en el apartado 7.1.1. A partir de esta información, se ajusta una tarifa de una entrada que proporcione el volumen con corteza en función únicamente del diámetro normal, que servirá sólo para cubicar el rodal en el que se han recogido los datos y para un tiempo determinado, para lo que se puede utilizar un método directo o un método indirecto. Posteriormente, se cubican todos los árboles extraídos de forma fraudulenta en la clara utilizando como variable de entrada en la tarifa ajustada el valor del diámetro normal de cada árbol estimado con la ecuación que relaciona esta variable con las dimensiones del tocón (ecuación [9.1], con las correspondientes estimaciones de los parámetros de la tabla 9.2).

Tabla 9.6. Datos de diámetro normal d (cm) y altura total h (m) de una muestra de árboles que permanecen en pie tras la clara en el ejemplo.

Árbol	d	h	Árbol	d	h	Árbol	d	h	Árbol	d	h
1	23,6	14,8	6	30,6	16,7	11	12,1	8,3	16	15,5	11,0
2	30,2	13,7	7	17,5	12,3	12	20,7	10,7	17	17,9	11,0
3	12,7	10,1	8	9,9	7,3	13	16,7	10,1	18	27,0	15,7
4	20,4	13,3	9	25,5	12,6	14	32,5	14,5	19	23,2	11,6
5	27,9	14,1	10	22,6	13,4	15	15,0	9,4	20	13,4	9,5

El método directo de ajuste de una tarifa de cubicación de una entrada consiste en calcular el volumen de la muestra de árboles que permanecen en pie tras la clara mediante una tarifa de cubicación de dos entradas $v = f(d, h)$ existente, y a partir de este volumen calculado y del valor de su diámetro normal ajustar una tarifa de cubicación de una entrada $v = f(d)$.

El método indirecto consiste en establecer por regresión la relación entre la altura total y el diámetro normal medidos en los árboles que permanecen en pie tras la clara, $h = g(d)$, y sustituir el valor de la altura así estimada en la tarifa de dos entradas existente para calcular el volumen individual de todos los árboles en función sólo de su diámetro normal, $v = f(d, g(d))$.

Como en el capítulo 7 se ejemplifica el uso de funciones altura-diámetro locales y generalizadas, en este capítulo se ha optado por emplear el método directo. Por tanto, el primer paso ha sido cubicar los 20 árboles de la tabla 9.6 mediante la tarifa de cubicación de dos entradas del capítulo 8 para la especie *Pinus pinaster* (ecuación [8.8], con las correspondientes estimaciones de los parámetros de la tabla 8.2):

$$v = 3,974 \cdot 10^{-5} \cdot d^{1,876} \cdot h^{1,079} \quad [9.7]$$

Aplicando entonces la ecuación [9.7] a los datos de la tabla 9.6 se obtienen los resultados que se exponen en la tabla 9.7.

Tabla 9.7. Volumen \hat{v} (m³) calculado con la tarifa de cubicación de dos entradas del capítulo 8 de la muestra de árboles que permanecen en pie tras la clara en el ejemplo.

Árbol	d	h	\hat{v}	Árbol	d	h	\hat{v}	Árbol	d	h	\hat{v}	Árbol	d	h	\hat{v}
1	23,6	14,8	0,274	6	30,6	16,7	0,508	11	12,1	8,3	0,042	16	15,5	11,0	0,090
2	30,2	13,7	0,400	7	17,5	12,3	0,128	12	20,7	10,7	0,151	17	17,9	11,0	0,118
3	12,7	10,1	0,057	8	9,9	7,3	0,025	13	16,7	10,1	0,095	18	27,0	15,7	0,376
4	20,4	13,3	0,186	9	25,5	12,6	0,266	14	32,5	14,5	0,488	19	23,2	11,6	0,204
5	27,9	14,1	0,356	10	22,6	13,4	0,227	15	15,0	9,4	0,072	20	13,4	9,5	0,059

Para expresar la relación entre el volumen y el diámetro normal de los árboles de la tabla 9.7 puede usarse la ecuación [9.8], ya que se ha comprobado que describe adecuadamente la dispersión de los datos del ejemplo:

$$v = a \cdot d^b \quad [9.8]$$

La parábola $v = a + b \cdot d + c \cdot d^2$ y la parábola incompleta $v = a + b \cdot d^2$ también podrían ser modelos candidatos para realizar la selección de la mejor función $v = f(d)$. La ecuación [9.8] se ha ajustado por la metodología de mínimos cuadrados ordinarios mediante regresión no lineal a los 20 pares de observaciones diámetro-volumen disponibles (tabla 9.7). La ecuación resultante, con unos valores de $R^2 = 0,974$ y REMC = 0,0250 m³ (ver significado y expresión matemática de estos estadísticos de bondad del ajuste en el anexo II), ha sido:

$$v = 1,232 \cdot 10^{-4} \cdot d^{2,398} \quad [9.9]$$

Por otra parte, la ecuación que permite estimar el diámetro normal d de los árboles de *Pinus pinaster* a partir del diámetro de su tocón d_{st} es (ecuación [9.1], con las correspondientes estimaciones de los parámetros de la tabla 9.2):

$$d = -0,7337 + 0,8170 \cdot d_{st} \quad [9.10]$$

Por tanto, para estimar el volumen de los árboles extraídos de forma fraudulenta en la clara basta con sustituir la parte derecha de la ecuación [9.10] por el diámetro normal en la ecuación [9.9], resultando la ecuación [9.11] en la que el diámetro del tocón medido es la única variable de entrada:

$$v = 1,232 \cdot 10^{-4} \cdot (-0,7337 + 0,8170 \cdot d_{st})^{2,398} \quad [9.11]$$

Aplicando la ecuación [9.11] a los datos del diámetro de tocón medidos en los 24 árboles cortados ilegalmente (tabla 9.4) se obtienen los resultados que se exponen en la tabla 9.8.

Tabla 9.8. Estimación del volumen del tronco \hat{v} (m³) de los árboles extraídos de forma fraudulenta a partir de su diámetro del tocón d_{st} (cm) empleando una tarifa de cubicación de una entrada ajustada específicamente para el rodal del ejemplo.

Árbol	d_{st}	\hat{v}	Árbol	d_{st}	\hat{v}	Árbol	d_{st}	\hat{v}	Árbol	d_{st}	\hat{v}
1	25,6	0,166	7	24,8	0,153	13	15,8	0,049	19	39,8	0,493
2	22,1	0,115	8	32,5	0,300	14	18,7	0,076	20	36,1	0,388
3	33,1	0,313	9	34,6	0,349	15	26,7	0,184	21	42,5	0,579
4	26,3	0,177	10	27,9	0,205	16	30,8	0,262	22	28,5	0,217
5	13,6	0,034	11	21,3	0,105	17	23,5	0,134	23	27,9	0,205
6	21,5	0,107	12	15,9	0,050	18	39,7	0,490	24	12,7	0,028

El volumen total extraído de forma fraudulenta, según este procedimiento, se calcula sumando los volúmenes estimados para cada uno de los árboles cortados ilegalmente (tabla 9.8), resultando en este caso 5,18 m³. Como puede comprobarse, este resultado difiere del obtenido con el primer procedimiento, pero ya se ha comentado que esta segunda metodología es más precisa, ya que considera la variación de la relación entre la altura total y el diámetro normal de los rodales regulares de una determinada especie en función de la calidad de estación, de la edad del rodal y de la densidad.

9.6. Bibliografía

- Bylin, C.V. 1982a. Estimating dbh from stump diameter for 15 southern species. USDA For. Ser. Res. Note SO-286.
- Bylin, C.V. 1982b. Volume prediction from stump diameter and stump height of selected species in Louisiana. USDA For. Ser. Res. Note SO-182.
- Corral-Rivas, J.J., Barrio-Anta, M., Aguirre-Calderón, O.A., Diéguez-Aranda, U. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry* 80(1), 29-49.
- Diéguez-Aranda, U., Barrio-Anta, M., Castedo-Dorado, F., Balboa-Murias, M. 2003. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 12(2), 131-139.
- Harvey, A.C. 1976 Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44, 461-465.
- Khatry Chhetri, D.B., Fowler, G.W. 1996. Estimating diameter at breast height and basal diameter of trees from stump measurements in Nepal's lower temperate broad-leaved forests. *For. Ecol. Manage.* 81, 75-84.
- McClure, J.P. 1968. Predicting tree dbh from stump measurements in the southeast. USDA For. Ser. Res. Note SE-99.
- Myers, C.A. 1963. Estimating volumes and diameters at breast height from stump diameters, southwestern ponderosa pine. USDA For. Ser. Res. Note RM-9.

- Nyland, R.D. 1975. Estimating volume from stump measurements for hardwoods. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry. AFRI Res. Note 14.
- Parresol, B.R. 1993. Modelling multiplicative error variance: an example predicting tree diameter from stump dimensions in baldcypress. *For. Sci.* 39, 670-679.
- Parresol, B.R. 1998. Prediction and error of baldcypress stem volume from stump diameter. *South. J. Appl. For.* 22(2), 69-73.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT® 9.1.2. User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Villarino, J.J. 1983. El abedul en Galicia. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Weigel, D.R., Johnson, P.S. 1997. Estimating dbh of southern Indiana oaks from stump diameter. USDA For. Ser. Tech. Brief TB-NC-4.

10. Ecuaciones de biomasa

10.1. Introducción

Se denomina biomasa a la cantidad de materia orgánica de seres vivos que existe en un determinado ecosistema, generalmente expresada por unidad de superficie o de volumen (Pardé, 1980). La biomasa forestal es, entonces, la existente en los ecosistemas forestales, y una parte importante de ella es la biomasa arbórea. En las formaciones forestales de latitudes o climas templados, la cantidad de biomasa acumulada en la vegetación del sotobosque o en el suelo puede llegar a ser también muy elevada, siendo la correspondiente al matorral la fracción predominante en las formaciones no arbóreas.

La cuantificación de la biomasa forestal es, actualmente, un aspecto importante a tener en cuenta en la gestión de las masas forestales por diversos motivos:

- ✓ El conocimiento de la dinámica de acumulación de biomasa ayuda a comprender el funcionamiento del ecosistema, particularmente los flujos de energía y nutrientes.
- ✓ La biomasa está despertando un gran interés como materia prima de procesos industriales y energéticos, por lo que su estimación permite evaluar las posibilidades energéticas e industriales a diferentes niveles (local, regional, etc.).
- ✓ La cuantificación de biomasa permite determinar el potencial de los sistemas forestales (especialmente los arbolados) para almacenar o “secuestrar” el CO₂ de la atmósfera a corto y medio plazo, en relación a su contribución al ciclo global del carbono. De esta manera, es posible evaluar el papel de los sistemas forestales en la mitigación del efecto invernadero y, por tanto, en la lucha contra el cambio climático.
- ✓ Conocer la biomasa acumulada en los sistemas forestales también es importante para los estudios de acumulación y continuidad del combustible en los montes (con el objetivo de determinar el riesgo de incendios), así como para los de estimación de daños derivados de derribos por temporales de viento o nieve.

Ejemplos de aplicación de los procedimientos de estimación de biomasa a algunos de estos campos en el caso gallego son los recientes trabajos de Balboa-Murias et al. (2006a, 2006b), o Rodríguez Soalleiro et al. (2007).

En general, la cuantificación, modelización y predicción de la biomasa de un árbol se lleva a cabo para cada una de sus fracciones o componentes por separado (madera, corteza, ramas, ramillos, hojas y raíces, figura 10.1). En la mayoría de las ocasiones sólo se considera la biomasa

de la parte aérea del árbol, debido a que el estudio de la biomasa subterránea implica unos elevados costes de muestreo y a que su aprovechamiento comercial no es frecuente. Sin embargo, hay que tener presente que la biomasa radical representa como media un 22% de la biomasa total de un árbol en el caso de coníferas, y un 47% en frondosas (Montero et al., 2005).



Figura 10.1. Muestras de distintas fracciones de biomasa del árbol habitualmente consideradas.

En este capítulo se presentan las ecuaciones de árbol individual desarrolladas por miembros del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible (UXFS)*, de la Universidad de Santiago de Compostela, para estimar la biomasa, expresada como peso seco de diferentes fracciones arbóreas, de las siguientes especies forestales en Galicia: *Betula alba*, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Quercus robur*. Para *Pinus sylvestris*, por ser una especie de elevado interés en Galicia y no disponerse actualmente de ecuaciones de este tipo elaboradas con datos de rodales gallegos, se incluyen las ecuaciones propuestas por Montero et al. (2005). También se presentan las ecuaciones de biomasa de rodal desarrolladas hasta el momento en el seno de la UXFS, en concreto para las especies *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*. Además, se incluyen los factores de expansión de biomasa (Unión Europea, 1999), para las especies mencionadas excepto para *Eucalyptus nitens*, con los que es posible determinar de una manera rápida (aunque menos precisa que con las ecuaciones anteriores) la biomasa arbórea de rodales forestales. Por último, se incluyen los porcentajes de contenido en carbono en la biomasa para las especies anteriores, en algunos casos por fracciones y en otros como media para el árbol.

10.2. Material y métodos

10.2.1. Datos

Las labores de campo para la obtención y modelización de la biomasa arbórea se fundamentaron en el apeo y toma de muestras de 294 pies de *Betula alba*, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Quercus robur*. Los pies muestreados se apearon en 39 parcelas localizadas en las provincias de Lugo, Pontevedra, A Coruña y Asturias, siendo sus principales características de diámetro normal y altura total las que figuran en la tabla 10.1.

En todos los casos se seleccionaron parcelas ubicadas en rodales monoespecíficos (entendiendo como tales aquellos con un porcentaje de pies inventariables de la misma especie superior al 90%) y de al menos una hectárea de superficie.

Tabla 10.1. Características de los árboles empleados para el ajuste de las ecuaciones de estimación de biomasa.

Especie	Parcelas	Árboles apeados	<i>d</i>				<i>h</i>			
			Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica	Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica
<i>Betula alba</i>	2	16	21,0	9,9	34,0	7,5	17,0	12,6	26,2	3,0
<i>Eucalyptus globulus</i>	9	34	15,7	6,5	32,0	6,2	16,5	8,7	27,8	5,1
<i>Eucalyptus nitens</i>	12	40	20,8	4,0	41,6	9,9	19,9	4,4	30,8	7,2
<i>Pinus pinaster</i>	6	125	23,0	5,3	49,2	11,6	15,1	7,1	23,8	5,2
<i>Pinus radiata</i>	6	48	34,0	9,5	73,2	15,2	23,3	12,9	33,9	6,6
<i>Quercus robur</i>	4	31	34,1	9,6	67,5	16,1	18,8	11,3	27,6	3,9

Nota: *d* = diámetro normal (cm); *h* = altura total (m).

En el caso de *Betula alba* pudieron establecerse tan solo dos parcelas, ubicadas en los términos municipales lucenses de Vilalba y Outero de Rei (Cela, 2004; Balboa-Murias et al., 2005).

La toma de datos de biomasa correspondiente a *Eucalyptus globulus* se realizó en rodales de primer turno ubicados en el norte de Galicia y el noroeste de Asturias, de edades comprendidas entre los 6 y los 18 años (Brañas et al., 2000).

En el caso de *Eucalyptus nitens* las parcelas se establecieron en el área donde se concentran la mayoría de las plantaciones gallegas de la especie, es decir, en el centro de las provincias de Lugo y A Coruña. Todas las parcelas muestreadas se ubicaron también en rodales de primer turno, siendo su edad de plantación inferior a los 14 años (Fernández-Rivas, 2008).

Para *Pinus pinaster* el muestreo abarcó las dos zonas definidas para la especie en Galicia por Vega Alonso et al. (1993): costa e interior (ver apartado 1.3 y figura 1.13), midiéndose tres parcelas en cada una de ellas. Dos de esas seis parcelas se establecieron en regenerados

naturales de la provincia de Pontevedra, siendo plantaciones las cuatro restantes. Todas las parcelas muestreadas correspondieron a rodales adultos (de 34 a 44 años) y con un elevado número de pies por hectárea (772 como media) debido al reducido número de claras realizado o al bajo peso de esas intervenciones. Información adicional sobre las parcelas muestreadas de esta especie puede consultarse en Balboa-Murias (2005).

El muestreo para la especie *Pinus radiata* se centró en la Meseta Central lucense, en plantaciones en todos los casos, y con edades desde 19 a 30 años, cubriendo por tanto las edades en que las cortas intermedias y finales suelen aplicarse. El número de pies por hectárea varió entre 400 y 1.700 (Barreiro-Díaz, 2003; Balboa-Murias et al., 2004b, 2006c).

Las ecuaciones que se presentan en este capítulo para *Pinus sylvestris* corresponden a las obtenidas por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), tras el apeo de 316 pies con un rango de diámetros de 6,2 a 76 cm en las provincias de Madrid y Segovia (Montero et al., 2005). No existe ningún trabajo similar realizado con datos de las plantaciones gallegas de la especie.

En el caso de *Quercus robur* se estudiaron cuatro rodales adultos situados en zona de valle en la provincia de Lugo. Todos ellos presentaban pies con un correcto porte forestal y un buen desarrollo, en muchos casos fustales sobre cepa. Más detalles sobre estos rodales pueden consultarse en Balboa-Murias (2005).

El diseño de muestreo empleado en las especies estudiadas en Galicia constó de dos fases. En una primera fase se replanteó una parcela temporal rectangular en cada uno de los 39 rodales estudiados, cuyas dimensiones variaron en función del número de pies por unidad de superficie, tratando de asegurar que se incluyese un mínimo de 35-40 árboles por parcela.

En una segunda fase se seleccionaron entre 3 y 10 árboles en cada rodal, que fueron apeados y muestreados destructivamente para determinar la distribución por fracciones de su biomasa. En este caso, su elección se fundamentó principalmente en la distribución diamétrica, de modo que el número de árboles apeados de cada clase diamétrica fuese proporcional al porcentaje de cada una de ellas con respecto al total. Además de este criterio diamétrico se tuvo en cuenta que los árboles seleccionados no mostrasen malformaciones en el tronco o la copa, o desarrollos anómalos o desequilibrados motivados por su proximidad a claros o bordes de masa o pista.

Antes del apeo de cada árbol se procedió a medir y anotar su diámetro normal d (cm) y su altura total h (m). En los árboles correspondientes a la especie *Eucalyptus nitens* se midió, además, la altura de la base de la copa viva h_{blc} (m) y el diámetro máximo de copa lcd (m), calculándose la longitud de copa cl (m) como $h - h_{blc}$. La base de la copa viva se definió como el punto de inserción en el tronco del primer verticilo de ramas vivas, excluyendo brotes epicórmicos o ramas muy pequeñas claramente separadas del conjunto de la copa, lo que resulta en general conveniente para *Eucalyptus nitens*.

En cada uno de los árboles, la biomasa aérea arbórea fue dividida en las siguientes fracciones: madera contenida en el fuste del árbol, correspondiente a la parte del tronco hasta 7 cm de diámetro con corteza en punta delgada (w_w); corteza contenida en el fuste (w_b); ramas de

diámetro mínimo en punta delgada de 7 cm (w_{b7}); ramas de diámetro máximo en punta gruesa de 7 cm y mínimo en punta delgada de 2 cm (w_{b2-7}); ramas de diámetro máximo en punta gruesa de 2 cm y mínimo en punta delgada de 0,5 cm ($w_{b0,5-2}$); ramas de diámetro máximo en punta gruesa de 0,5 cm ($w_{b0,5}$); y hojas (w_l). Esta última fracción correspondió, lógicamente, a hojas propiamente dichas en las dos frondosas caducifolias, a filodios en las dos especies de eucalipto y a acículas en las tres especies de pino. Todas las fracciones de ramas se analizaron como componentes íntegros formados por madera más corteza. Para los pies de *Eucalyptus nitens*, y debido a su importancia cuantitativa en esta especie, se consideró además la fracción de ramas secas (w_{db}) que se sitúan a lo largo del fuste del árbol pero no forman parte de la copa como tal.

En el momento del apeo se pesaron en verde la totalidad de las fracciones con una báscula que proporcionaba una precisión de 100 g. Además, se cubicaron todas las trozas con y sin corteza por la fórmula de Smalian (ver capítulo 8), para el cálculo posterior de la densidad de la madera.

Cuando las trozas eran de unas dimensiones tales que impedían su pesaje en campo (80-90 kg) solamente se cubicaban, empleando para ello la mencionada fórmula de Smalian, y entonces su densidad se calculaba como media de las densidades de las diferentes trozas que componían el árbol y que sí se habían podido pesar y cubicar. Posteriormente se determinaba el peso húmedo de las trozas solamente cubicadas multiplicando el volumen de la troza por la densidad media de la madera del árbol.

Asimismo, se tomaron en monte muestras del fuste en forma de discos transversales (rodajas) a diferentes alturas, de modo que en el laboratorio, después de separar madera y corteza, se pudiese determinar el porcentaje en peso húmedo de cada una de ellas.



Figura 10.2. Toma de muestras para la estimación de biomasa en un rodal de *Quercus robur*.

La totalidad de las ramas de las fracciones de mayor grosor de cada árbol (w_{b7} , w_{b2-7} y w_{db}) fueron pesadas en verde en el monte. Además, se tomaron muestras de forma aleatoria de cada una de esas fracciones para su secado en laboratorio, representando las partes alta, media y baja de la copa. En todos los casos, el tamaño de la muestra para las fracciones de copa osciló entre el 10 y el 15% del peso total verde.

Se procedió de forma similar para estimar la biomasa del resto de fracciones de copa ($w_{b0,5-2}$, $w_{b0,5}$ y w_l), que fueron pesadas en húmedo conjuntamente en monte. De esas fracciones se tomó una muestra conjunta representativa de las partes alta, media y baja de la copa, la cual se llevó al laboratorio en bolsas de plástico cerradas, evitando la pérdida de humedad en el transporte. Después de separar y pesar en verde en laboratorio estas tres fracciones se estableció el porcentaje en peso húmedo de cada una de ellas.

Las muestras húmedas de todas las fracciones del árbol fueron llevadas a laboratorio para determinar su peso seco, utilizando para ello un proceso de secado a 65 °C hasta peso constante (cuando dos mediciones realizadas con una separación de 12 horas difieren en menos de un 0,5% en peso). Ello permitió, posteriormente, la determinación de concentraciones de nutrientes.

En el caso de *Betula alba*, *Pinus radiata* y *Quercus robur* se muestreó también la biomasa radical, con una muestra más reducida (6, 11 y 12 árboles respectivamente) que la empleada para estimar la biomasa arbórea. Para ello, con una excavadora se realizó una zanja alrededor del tocón, extrayendo éste y el sistema radical, que se llevaron a pesar a una báscula industrial. Este procedimiento permitió obtener la fracción de raíces gruesas (incluyendo su corteza), que resulta la dominante en términos de peso, y que representa aproximadamente a las raíces de más de 2 cm de grosor (Montero et al., 2005).

10.2.2. Modelos analizados y metodología de ajuste

Para modelizar la biomasa total del árbol o del rodal, o de alguna de sus fracciones, se puede emplear una gran variedad de modelos distintos, aunque todos ellos derivan de funciones lineales, alométricas o logarítmicas (Pardé, 1980; Snowdon, 1985; Parresol, 1999). Especialmente empleados son los modelos alométricos, que asumen que el crecimiento de una parte del árbol o del rodal (en este caso la biomasa total o por fracciones) es proporcional al de otras variables características del árbol o del rodal.

La expresión general de estos modelos es la siguiente:

$$w_i = a \cdot x^b \quad [10.1]$$

donde x es la variable que define la dimensión del árbol o las características del rodal, w_i la biomasa total o de algún componente, y a y b los parámetros a estimar. Por tanto, estos modelos, una vez ajustados, permiten realizar estimaciones del peso total y de diferentes fracciones de árbol o de rodal a partir del valor de alguna de sus variables características.

En los modelos predictivos de la biomasa de un árbol (total o de sus diferentes componentes), las variables explicativas más empleadas son el diámetro normal y la altura total, y en ocasiones otras variables relacionadas con las dimensiones de la copa.

Por su parte, las variables explicativas normalmente empleadas en las ecuaciones de estimación de la biomasa de un rodal (total o de alguno de sus componentes) son coincidentes con las comúnmente usadas en tarifas de cubicación de rodal, y están relacionadas con la

densidad (p. ej., número de pies por hectárea, área basimétrica, diámetro medio cuadrático) y el estado de desarrollo del rodal (p. ej., altura dominante, edad). En este caso, los valores de la variable dependiente que se utilizan para ajustar el modelo (biomasa total o por fracciones por unidad de superficie) se obtienen aplicando las ecuaciones de árbol individual a los datos de parcelas temporales o permanentes, agregando los valores por parcela y refiriéndolos a la hectárea.

El ajuste de funciones de estimación de biomasa plantea habitualmente diversos problemas estadísticos a los que deben darse respuesta, siendo uno de los más importantes el de asegurar la “aditividad” (Kozak, 1970; Chiyenda y Kozak, 1984; Parresol, 2001, Balboa-Murias et al., 2004a). Esta propiedad consiste en que la suma de las estimaciones de los pesos de todas las fracciones de la biomasa, para un árbol o para un rodal, debe ser igual al peso estimado directamente mediante la ecuación de biomasa total. En los ajustes realizados en los trabajos que han dado lugar a las ecuaciones que se presentan en este capítulo se aplicaron las técnicas estadísticas de ajuste más avanzadas, que tienen en cuenta éste y otros problemas estadísticos que suelen surgir en el desarrollo de ecuaciones de estimación de biomasa, como son la heterocedasticidad (varianza no constante de los residuos) o la dependencia entre las variables independientes (Álvarez González et al., 2007). Así, el problema de heterocedasticidad se corrigió utilizando regresión ponderada, con un peso igual a la inversa de la varianza de cada observación. Dicha varianza σ_i^2 , que es desconocida, se estimó utilizando una función potencial, p. ej. $\sigma_i^2 = \gamma \cdot d^k$ en el caso de modelos con una única variable independiente, y $\sigma_i^2 = \gamma \cdot (d^2 \cdot h)^k$ en aquellos con dos variables independientes. Los valores de γ y del exponente k se optimizaron empleando la metodología propuesta por Harvey (1976), que consiste en emplear los errores del modelo ajustado sin pesos como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error. Finalmente, los pesos considerados fueron $1/d^k$ ó $1/(d^2 \cdot h)^k$, respectivamente.

10.3. Resultados

10.3.1. Ecuaciones de biomasa de árbol individual

En la tabla 10.2 se muestran las ecuaciones de estimación de biomasa de árbol individual para todas las especies estudiadas. Todas las estimaciones de los parámetros resultaron significativas al nivel del 5%. También se incluye información sobre el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), estadísticos de bondad del ajuste cuya expresión y significado pueden consultarse en el anexo II. Se aporta, además, el valor medio obtenido de concentración de carbono en la materia seca cc (%) para cada una de las fracciones consideradas.

En todas las ecuaciones la biomasa se expresa como el peso seco, en kg, de cada fracción del árbol, y la biomasa total del árbol se puede calcular como la suma de la biomasa de las diferentes fracciones que lo componen. Para el caso de *Eucalyptus nitens*, se presentan dos sistemas de ecuaciones distintas: una considerando variables de copa y otra considerando sólo el diámetro y la altura del árbol.

A la vista de los estadísticos de bondad del ajuste expuestos en la tabla 10.2, la precisión en la estimación de la biomasa correspondiente a la fracción de madera es siempre alta, ya que las ecuaciones obtenidas explican, para todas las especies, más del 90% de la variabilidad existente. La ecuación correspondiente a la fracción de corteza presenta también, en general, una buena capacidad predictiva, si bien es destacable la dificultad de estimación de esta fracción en el caso de *Eucalyptus nitens*. Las ecuaciones correspondientes a las fracciones de copa presentan, en general, una menor precisión que las anteriores, particularmente en el caso de los ramillos.

De acuerdo con la tabla 10.2, el empleo de variables relacionadas con las dimensiones de la copa mejora las estimaciones de las fracciones de copa definidas para *Eucalyptus nitens*. Los usuarios de estos modelos pueden entonces elegir, de acuerdo con las variables de entrada que tengan disponibles o del tipo de inventario que pretendan realizar, entre una de las dos opciones que se presentan.

Tabla 10.2. Ecuaciones para la estimación de la biomasa según fracciones en árboles de las principales especies con interés comercial en Galicia, valores de los estadísticos de bondad del ajuste y concentración de carbono.

Especie	Fracción	R^2	REMC (kg)	cc (%)
<i>Betula alba</i> ¹	$w_w = 0,1485 \cdot d^{2,223}$	0,908	35,8	48,5
	$w_b = 0,03010 \cdot d^{2,186}$	0,900	6,70	48,5
	$w_{b7} = 1,515 \cdot e^{0,09040 \cdot d}$	0,544	10,7	48,5
	$w_{b2-7} = 0,1374 \cdot d^{1,760}$	0,877	7,40	48,5
	$w_{b0,5-2} = 0,05000 \cdot d^{1,618}$	0,726	2,57	48,5
	$w_{b0,5} = 0,03720 \cdot d^{1,581}$	0,492	2,81	48,5
	$w_l = 0,03460 \cdot d^{1,645}$	0,664	2,29	48,5
	$w_r = 1,042 \cdot d^{1,254}$	0,823	12,8	48,5
<i>Eucalyptus globulus</i>	$w_w + w_{b7} = 0,01308 \cdot d^{1,870} \cdot h^{1,172}$	0,989	13,4	45,2
	$w_b = 0,01010 \cdot d^{2,484}$	0,932	3,82	42,5
	$w_{b2-7} + w_{b0,5-2} = 0,003685 \cdot d^{2,654}$	0,841	5,16	45,3
	$w_{b0,5} = 0,01258 \cdot d^{1,705}$	0,586	0,971	46,4
	$w_l = 0,02949 \cdot d^{1,917}$	0,706	4,38	52,0

¹ Para *Betula alba* se aporta el valor medio de concentración en carbono para la totalidad del árbol obtenido por Montero et al. (2005).

Tabla 10.2 (continuación). Ecuaciones para la estimación de la biomasa según fracciones en árboles de las principales especies con interés comercial en Galicia, valores de los estadísticos de bondad del ajuste y concentración de carbono.

Especie	Fracción	R^2	REMC (kg)	cc (%)
<i>Eucalyptus nitens</i> (sin variables de copa)	$w_w + w_{b7} = 0,009400 \cdot d^{2,033} \cdot h^{1,056}$	0,990	17,9	50,1
	$w_b = 0,01342 \cdot d^{2,361}$	0,710	15,3	46,9
	$w_{b2-7} = 0,00005900 \cdot d^{3,760}$	0,897	6,01	49,8
	$w_{b0,5-2} = 0,01280 \cdot d^{1,858}$	0,756	2,24	49,8
	$w_{b0,5} = 0,0009220 \cdot d^{2,632}$	0,831	2,09	51,5
	$w_l = 0,005300 \cdot d^{2,393}$	0,813	5,59	57,2
	$w_{db} = 0,1451 \cdot d^{1,403}$	0,397	10,6	50,4
<i>Eucalyptus nitens</i> (con variables de copa)	$w_w + w_{b7} = 0,1495 \cdot d^{2,052} \cdot h^{0,8946}$	0,989	18,2	50,1
	$w_b = 0,03190 \cdot d^{2,108}$	0,708	15,3	46,9
	$w_{b2-7} = 0,0008220 \cdot d^{2,644} \cdot lcd^{0,7627}$	0,918	5,36	49,8
	$w_{b0,5-2} = 0,03005 \cdot d^{1,590}$	0,708	2,44	49,8
	$w_{b0,5} = 0,006230 \cdot d^{1,949} \cdot lcd^{0,2189}$	0,890	1,69	51,5
	$w_l = 0,01680 \cdot d^{1,516} \cdot cl^{0,7747}$	0,872	4,62	57,2
	$w_{db} = 0,007933 \cdot d^{1,279} \cdot h_{blc}^{1,254}$	0,419	39,9	50,4
<i>Pinus pinaster</i>	$w_w + w_{b7} = 0,3882 + 0,01149 \cdot d^2 \cdot h$	0,908	51,2	47,1
	$w_b = 0,007900 \cdot d^{2,098} \cdot h^{0,4660}$	0,943	6,29	50,8
	$w_{b2-7} = 3,202 - 0,01484 \cdot d^2 - 0,4228 \cdot h + 0,00279 \cdot d^2 \cdot h$	0,806	13,8	47,9
	$w_{b0,5-2} = 0,09781 \cdot d^{2,288} \cdot h^{-0,9648}$	0,826	4,74	50,5
	$w_{b0,5} = 0,001880 \cdot d^{2,154}$	0,678	1,42	49,7
	$w_l = 0,005000 \cdot d^{2,383}$	0,823	5,81	49,7
<i>Pinus radiata</i>	$w_w + w_{b7} = 0,01230 \cdot d^{1,604} \cdot h^{1,413}$	0,96	53,6	50,4
	$w_b = 0,003600 \cdot d^{2,656}$	0,921	11,1	54,1
	$w_{b2-7} = 1,938 + 0,001065 \cdot d^2 \cdot h$	0,660	19,9	51,3
	$w_{b0,5-2} = 0,03630 \cdot d^{2,609} \cdot h^{-0,9417}$	0,809	6,02	52,5
	$w_{b0,5} = 0,007800 \cdot d^{1,961}$	0,691	1,49	53,2
	$w_l = 0,04230 \cdot d^{1,714}$	0,789	6,97	52,7
	$w_r = 0,06174 \cdot d^{2,144}$	0,939	19,6	49,7

Tabla 10.2 (continuación). Ecuaciones para la estimación de la biomasa según fracciones en árboles de las principales especies con interés comercial en Galicia, valores de los estadísticos de bondad del ajuste y concentración de carbono.

Especie	Fracción	R^2	REMC (kg)	cc (%)
<i>Pinus sylvestris</i> ¹	$w_w + w_b = 0,02321 \cdot d^{2,708}$	0,947	--	50,9
	$w_{b7} = 3,700 \cdot 10^{-7} \cdot d^{4,804}$	0,816	--	50,9
	$w_{b2-7} = 0,02036 \cdot d^{2,141}$	0,721	--	50,9
	$w_{b0,5-2} + w_{b0,5} = 0,1432 \cdot d^{1,510}$	0,625	--	50,9
	$w_l = 0,1081 \cdot d^{1,510}$	0,625	--	50,9
	$w_r = 0,01089 \cdot d^{2,628}$	0,970	--	50,9
<i>Quercus robur</i>	$w_w = -5,714 + 0,01823 \cdot d^2 \cdot h$	0,939	147,3	48,4
	$w_b = -1,500 + 0,03154 \cdot d^2 + 0,001110 \cdot d^2 \cdot h$	0,801	41,1	51,2
	$w_{b7} = 3,427 \cdot 10^{-9} \cdot (d^2 \cdot h)^{2,310}$	0,575	162,3	49,1
	$w_{b2-7} = 4,268 + 0,003410 \cdot d^2 \cdot h$	0,858	37,4	48,4
	$w_{b0,5-2} = 0,03851 \cdot d^{1,784}$	0,799	8,41	50,3
	$w_{b0,5} = 1,379 + 0,0002400 \cdot d^2 \cdot h$	0,617	4,14	50,7
	$w_l = 0,01985 \cdot (d^2 \cdot h)^{0,7375}$	0,832	11,2	50,4
	$w_r = 0,01160 \cdot (d^2 \cdot h)^{0,9625}$	0,854	103,6	48,6

Nota: w_w = biomasa de madera en el fuste (kg); w_b = biomasa de corteza en el fuste (kg); w_{b7} = biomasa de madera y corteza de ramas con diámetro mínimo en punta delgada de 7 cm (kg); w_{b2-7} = biomasa de madera y corteza de ramas con diámetro máximo en punta gruesa de 7 cm y mínimo en punta delgada de 2 cm (kg); $w_{b0,5-2}$ = biomasa de madera y corteza de ramas con diámetro máximo en punta gruesa de 2 cm y mínimo en punta delgada de 0,5 cm (kg); $w_{b0,5}$ = biomasa de madera y corteza de ramas con diámetro máximo en punta gruesa de 0,5 cm (kg); w_l = biomasa de hojas (kg); w_r = biomasa de raíces (kg); w_{db} = biomasa de ramas secas a lo largo del fuste (kg); d = diámetro normal (cm); h = altura total (m); cl = longitud de copa (m); h_{blc} = altura de la base de la copa viva (m); lcd = diámetro máximo de copa (m); cc = valor medio de concentración de carbono en la materia seca (%) (ver anexo I para una definición más pormenorizada de las variables y anexo II para los estadísticos de bondad del ajuste).

10.3.2. Ecuaciones de biomasa de rodal

En la tabla 10.3 se muestran las ecuaciones de estimación de biomasa aérea de rodal desarrolladas por Barrio-Anta et al. (2006) y Castedo-Dorado et al. (2009) a partir de datos de parcelas de crecimiento de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* en Galicia, respectivamente. En el caso de *Pinus pinaster* se consideró la diferente pauta de crecimiento en las dos zonas que fueron definidas en Galicia por Vega Alonso et al. (1993): costa e interior (ver apartado 1.3 y figura 1.13). Todas las estimaciones de los parámetros que aparecen en dicha tabla resultaron significativas al

¹ Para *Pinus sylvestris* se aporta el valor medio de concentración en carbono para la totalidad del árbol obtenido por Montero et al. (2005). Además, en dicha publicación no se indica el valor del estadístico REMC para esta especie.

nivel del 5%. También se incluye información sobre el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC), estadísticos de bondad del ajuste cuya expresión y significado pueden consultarse en el anexo II.

Tabla 10.3. Ecuaciones para la estimación de la biomasa aérea total en rodales de dos especies forestales gallegas.

Especie	Ecuación	R^2	REMC (t/ha)
<i>Pinus pinaster</i>	$W = 3,390 \cdot 10^{-4} \cdot d_g^{1,284-0,0584I} \cdot H_0^{1,465} \cdot N^{0,7277+0,0220I}$	0,968	9,51
<i>Pinus radiata</i>	$W = 2,319 \cdot 10^{-5} \cdot d_g^{1,928} \cdot H_0^{0,9210} \cdot N^{1,007}$	0,996	4,80

Nota: W = biomasa arbórea aérea total del rodal (t/ha); d_g = diámetro medio cuadrático del rodal (cm); H_0 = altura dominante del rodal (m, ver apartado 2.1.6 y anexo I); N = número de pies por hectárea; I = variable *dummy* (ficticia) que toma el valor 1 para la zona costera y 0 para la zona interior.

Cuando se pretenden hacer estimaciones del carbono contenido en un rodal a partir de su biomasa total aérea, es necesario disponer del valor medio de la concentración de carbono para el conjunto de fracciones. En la tabla 10.4 se muestra la media ponderada de la concentración de carbono en función de la importancia relativa en peso de cada una de las fracciones de la biomasa aérea, para varias de las especies estudiadas. Esta concentración de carbono se ha calculado en dos pasos: en primer lugar, se ha determinado la importancia relativa de cada fracción sobre la biomasa total por clases diamétricas de 5 cm de amplitud dentro del rango de validez de los modelos (en aquellos que incluyen como variable independiente la altura total del árbol se ha utilizando, además, la altura media de cada clase diamétrica que aparece reflejada en el Tercer Inventario Forestal Nacional, Xunta de Galicia, 2001). En segundo lugar, se ha empleado la importancia relativa calculada anteriormente como factor de ponderación de las concentraciones de carbono de cada fracción que se muestran en la tabla 10.2.

Tabla 10.4. Concentración de carbono media ponderada para el total de las fracciones de biomasa aérea (%).

Especie	Media	Mínimo	Máximo	Desv. típica
<i>Betula alba</i>	48,5	--	--	--
<i>Eucalyptus globulus</i>	45,1	42,5	52,0	3,5
<i>Eucalyptus nitens</i>	50,1	46,9	57,2	3,1
<i>Pinus pinaster</i>	47,9	47,1	50,8	1,5
<i>Pinus radiata</i>	51,3	50,4	54,1	1,3
<i>Pinus sylvestris</i>	50,9	--	--	--
<i>Quercus robur</i>	48,9	48,4	51,2	1,1

Nota: en el caso de *Betula alba* y *Pinus sylvestris*, al no disponerse de datos sobre la concentración de carbono para las distintas fracciones, se consideran válidos los valores medios ya indicados en la tabla 10.2.

10.3.3. Factores de expansión de biomasa

Los factores de expansión de biomasa, conocidos como *Biomass Expansion Factors* (BEFs) en la literatura anglosajona (Lehtonen et al., 2004), permiten convertir directamente los valores de

volumen de fuste con corteza en biomasa total aérea expresada en peso seco. Históricamente se han aplicado unos BEFs constantes para una determinada especie y ámbito geográfico (FAO, 2001), aunque se sabe que dependen de la calidad de estación y de la fase de desarrollo en la que se encuentra el rodal. Los BEFs propuestos para España, en el caso de las especies estudiadas en este capítulo (excepto *Eucalyptus nitens*), son los indicados en la tabla 10.5 (Unión Europea, 1999).

Tabla 10.5. Factores de expansión de biomasa para varias especies forestales de Galicia (Unión Europea, 1999).

Especie	BEF
<i>Betula alba</i>	0,73
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,81
<i>Pinus pinaster</i>	0,55
<i>Pinus radiata</i>	0,44
<i>Pinus sylvestris</i>	0,62
<i>Quercus robur</i>	0,84

El empleo de los BEFs proporciona estimaciones de biomasa diferentes a las que se obtienen si se usan las ecuaciones de árbol individual o de rodal, debido a que son un valor único para cada especie que no considera las características del rodal.

10.4. Conclusiones y recomendaciones de uso

Las ecuaciones de árbol individual que se presentan en este capítulo son de fácil utilización práctica, ya que para la mayor parte de las especies y fracciones consideradas sólo se necesita medir el diámetro normal y, en ocasiones, la altura total del árbol. La primera variable suele medirse en todos los pies del rodal o de las parcelas de muestreo en los inventarios forestales convencionales, mientras que la segunda sólo en una parte de esos árboles. Este inconveniente puede subsanarse estimando la altura de los pies en los que no se haya medido esta variable mediante una ecuación altura-diámetro local o generalizada (ver capítulo 7).

En el caso de *Eucalyptus nitens* es posible mejorar la precisión de las estimaciones a costa del mayor esfuerzo de muestreo que supone la medición de variables referidas a la copa del árbol. Es el usuario, según los datos de inventario de que disponga o de los recursos económicos para llevarlo a cabo, quien debe decidir las ecuaciones a emplear.

En cuanto al rango de aplicación de las ecuaciones propuestas, se considera que geográficamente está limitado a Galicia. El rango de validez dimensional para cada especie viene dado por el tamaño de los pies empleados en el ajuste de las ecuaciones (ver tabla 10.1). No se recomienda el uso de estas ecuaciones en plantaciones energéticas, puesto que las dimensiones de los árboles (fundamentalmente diámetro normal y altura total) procedentes de este tipo de plantaciones, así como el número de pies por unidad de superficie que habitualmente se emplean,

se encuentran fuera del rango de datos utilizado para la elaboración de los modelos que se presentan.

Es importante indicar que las ecuaciones de árbol individual se deben utilizar exclusivamente para estimar la biomasa de un rodal o de un lote de árboles (ya sea para obtener el valor global de la biomasa total o de una determinada fracción) y nunca para estimar la biomasa de un solo árbol, ya que esto conllevaría un error importante. Este error, que unas veces es por exceso y otras por defecto, se compensa cuando se suman los valores de biomasa de muchos árboles para estimar la biomasa, total o de una determinada fracción, del rodal o de un lote de árboles. Asimismo, en términos relativos, este error es mayor en árboles de pequeñas dimensiones que en los de grandes dimensiones, y también superior en la predicción para una determinada fracción que para la biomasa total del árbol.

Por último, es necesario señalar que para determinar la biomasa arbórea en las masas forestales presentes en una amplia región geográfica es bastante frecuente emplear los factores de expansión de biomasa (BEFs). Esta es una alternativa muy práctica cuando se dispone de datos de volumen, aunque las estimaciones de biomasa obtenidas mediante ecuaciones de árbol o de rodal son más precisas y, por tanto, más recomendables.

10.5. Ejemplo de estimación de biomasa forestal

En el CD-ROM adjunto a este libro se incluye el archivo de Microsoft® Office Excel 2003 denominado 10_BIO.xls ("Biomasa"), que automatiza el proceso de estimación de biomasa y contenido en carbono de un rodal (o un lote de árboles) a partir de la información del diámetro normal y, en ocasiones, de la altura total de los árboles que lo constituyen.

Para ilustrar los cálculos que se realizan en dicho archivo, a continuación se expone un ejemplo de estimación de la biomasa de un rodal. Supóngase para ello que se pretende estimar la biomasa forestal, así como el contenido en carbono, de un rodal coetáneo de *Pinus radiata* de 16 años de edad. Para ello se ha replanteado una parcela circular de 10 m de radio y se han medido el diámetro normal y la altura total de todos los pies contenidos en ella. Los datos del inventario se muestran en la tabla 10.6.

Para resolver este ejemplo se van a emplear los tres métodos descritos en el capítulo: ecuaciones de biomasa de árbol individual, ecuaciones de biomasa de rodal y factores de expansión de biomasa (BEFs).

Tabla 10.6. Datos del inventario de la parcela del ejemplo.

Árbol	<i>d</i>	<i>h</i>	Árbol	<i>d</i>	<i>h</i>	Árbol	<i>d</i>	<i>h</i>
1	13,0	13,9	16	23,5	18,4	31	14,0	7,1
2	12,0	12,0	17	11,0	10,9	32	14,5	9,8
3	12,8	11,7	18	8,0	10,9	33	13,0	16,1
4	17,8	13,0	19	18,0	15,7	34	13,8	15,2
5	20,5	17,3	20	20,5	16,5	35	16,0	16,5
6	19,0	19,0	21	18,0	15,4	36	10,0	10,1
7	10,5	12,3	22	22,0	17,0	37	21,5	17,9
8	11,5	10,9	23	22,5	19,2	38	17,5	16,8
9	20,5	17,9	24	21,0	18,4	39	20,5	18,1
10	10,5	10,7	25	16,0	16,8	40	18,5	17,9
11	21,5	18,7	26	19,5	18,8	41	15,5	14,3
12	14,5	14,9	27	15,0	16,6	42	13,9	14,5
13	21,5	16,9	28	22,5	16,9	43	17,5	15,8
14	12,8	16,1	29	12,0	14,5	44	17,0	17,6
15	23,0	17,6	30	12,0	9,3	45	14,0	15,8

Nota: *d* = diámetro normal (cm); *h* = altura total (m).

10.5.1. Estimación de biomasa a partir de las ecuaciones de árbol individual

Para estimar la biomasa forestal mediante ecuaciones de árbol individual es necesario aplicar las ecuaciones de las distintas fracciones a cada uno de los pies medidos en el inventario. La biomasa total de cada pie se calcula, entonces, mediante la suma de los valores de biomasa obtenidos para cada una de sus fracciones. En la tabla 10.7 se muestra el resultado de aplicar a los pies inventariados en la parcela las ecuaciones de biomasa de árbol individual, por fracciones, correspondientes a *Pinus radiata* (ver tabla 10.2), así como la biomasa total de cada pie.

Una vez estimada la biomasa (kg) de cada pie por fracciones, y sabiendo que la superficie de la parcela es de 314,16 m², la biomasa en toneladas por hectárea de cada fracción considerada se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$W_x = \frac{\sum_{i=1}^n w_{xi}}{314,16} \cdot 10.000 \quad [10.2]$$

siendo W_x la biomasa de la fracción *x* (t/ha), y w_{xi} la biomasa de la fracción *x* en el árbol *i* (t/pie).

El resultado obtenido para el peso seco de la biomasa aérea es de 119,5 t/ha, y de 158,1 t/ha para la biomasa total (aérea más radical).

Para calcular el carbono contenido en cada una de las fracciones se multiplica la concentración de carbono *cc* (%) de las distintas fracciones de *Pinus radiata* (que se muestran en la tabla 10.2) por la estimación de peso seco de cada fracción, obteniéndose unos resultados de 61,1 t/ha de carbono para la biomasa aérea, y de 80,3 t/ha de carbono para la biomasa total.

Tabla 10.7. Estimación de la biomasa (kg) contenida en cada una de las fracciones consideradas para la muestra de árboles de la parcela del ejemplo (ver notación de las variables en la tabla 10.2).

Árbol	W_w	W_b	W_{b2-7}	$W_{b0,5-2}$	$W_{b0,5}$	W_l	W_r	W
1	31,03	3,27	4,44	2,45	1,19	3,43	15,10	45,82
2	22,17	2,65	3,78	2,29	1,02	2,99	12,72	34,89
3	23,58	3,11	3,96	2,74	1,15	3,32	14,48	38,12
4	46,52	7,48	6,30	5,89	2,20	5,85	29,43	74,62
5	87,76	10,97	9,68	6,55	2,91	7,49	40,08	125,38
6	88,70	8,97	9,24	4,92	2,51	6,58	34,06	120,92
7	18,53	1,86	3,38	1,58	0,78	2,38	9,55	28,51
8	18,08	2,36	3,47	2,24	0,94	2,78	11,61	29,87
9	92,10	10,97	9,95	6,35	2,91	7,49	40,08	129,77
10	15,22	1,86	3,19	1,80	0,78	2,38	9,55	25,23
11	105,74	12,45	11,14	6,90	3,20	8,13	44,39	147,56
12	40,78	4,37	5,27	3,06	1,48	4,14	19,08	59,10
13	91,65	12,45	10,26	7,58	3,20	8,13	44,39	133,28
14	37,02	3,11	4,73	2,03	1,15	3,32	14,48	51,69
15	108,15	14,90	11,85	8,70	3,65	9,13	51,30	156,38
16	119,20	15,77	12,76	8,83	3,81	9,47	53,72	169,84
17	16,83	2,10	3,34	2,00	0,86	2,58	10,55	27,71
18	10,10	0,90	2,68	0,87	0,46	1,49	5,33	16,51
19	62,11	7,77	7,36	5,11	2,26	6,00	30,33	90,60
20	82,08	10,97	9,32	6,85	2,91	7,49	40,08	119,64
21	60,44	7,77	7,25	5,21	2,26	6,00	30,33	88,92
22	95,89	13,24	10,70	8,01	3,35	8,46	46,64	139,64
23	118,06	14,05	12,29	7,57	3,50	8,79	48,94	164,26
24	99,53	11,70	10,58	6,58	3,05	7,81	42,21	139,25
25	56,58	5,68	6,52	3,53	1,79	4,90	23,56	79,00
26	91,10	9,61	9,55	5,32	2,64	6,88	36,01	125,09
27	50,16	4,79	5,92	3,02	1,58	4,39	20,52	69,84
28	98,58	14,05	11,05	8,54	3,50	8,79	48,94	144,51
29	28,97	2,65	4,16	1,91	1,02	2,99	12,72	41,70
30	15,47	2,65	3,36	2,91	1,02	2,99	12,72	28,40
31	13,52	3,98	3,42	5,60	1,38	3,90	17,70	31,81
32	22,56	4,37	4,13	4,53	1,48	4,14	19,08	41,22
33	38,19	3,27	4,84	2,14	1,19	3,43	15,10	53,06
34	38,52	3,80	5,00	2,61	1,33	3,78	17,03	55,38
35	55,16	5,68	6,44	3,59	1,79	4,90	23,56	77,56
36	12,97	1,63	3,01	1,67	0,71	2,19	8,60	22,19
37	99,41	12,45	10,75	7,19	3,20	8,13	44,39	141,12
38	65,33	7,21	7,42	4,46	2,14	5,71	28,55	92,26
39	93,55	10,97	10,04	6,28	2,91	7,49	40,08	131,25
40	78,11	8,35	8,46	4,85	2,38	6,28	32,16	108,45
41	42,82	5,22	5,60	3,78	1,68	4,64	22,01	63,75
42	36,67	3,91	4,92	2,81	1,36	3,85	17,43	53,52
43	59,90	7,21	7,09	4,72	2,14	5,71	28,55	86,77
44	66,60	6,67	7,36	3,96	2,02	5,44	26,83	92,04
45	41,88	3,98	5,24	2,64	1,38	3,90	17,70	59,02
Total	2.598,15	313,36	311,30	202,28	90,22	240,18	1.212,21	3.755,47

10.5.2. Estimación de biomasa a partir de las ecuaciones de rodal

Para estimar la biomasa aérea mediante la ecuación de rodal propuesta en la tabla 10.3, es necesario calcular las siguientes variables: el diámetro medio cuadrático d_g , la altura dominante H_0 (ver apartado 2.1.6 y anexo I) y el número de pies por hectárea N . Los valores obtenidos para estas variables de rodal a partir de los datos de la tabla 10.6 son: $d_g = 17,0$ cm, $H_0 = 18,4$ m y $N = 1.432$ pies/ha. Aplicando la ecuación [10.3], correspondiente a *Pinus radiata* (tabla 10.3), se obtiene el siguiente valor de biomasa aérea total del rodal:

$$W = 2,319 \cdot 10^{-5} \cdot 17,0^{1,928} \cdot 18,4^{0,9210} \cdot 1.432^{1,007} = 120,4 \text{ t/ha} \quad [10.3]$$

Sabiendo que la concentración de carbono media para el total de la biomasa aérea para *Pinus radiata* es del 51,3% (tabla 10.4), la cantidad total de carbono acumulado en el rodal es de 61,8 t/ha.

10.5.3. Estimación mediante factores de expansión de biomasa

La estimación del peso seco de biomasa forestal arbórea a partir del factor de expansión de biomasa (BEF) es una forma rápida de obtener una primera aproximación cuando se dispone previamente de información del volumen. Sin embargo, para estudios más detallados sería necesaria una estimación más precisa mediante los procedimientos descritos en los apartados anteriores.

Para aplicar el BEF correspondiente a esta especie es necesario estimar previamente el volumen del tronco con corteza de cada uno de los pies de la parcela con la ecuación [10.4] (ecuación [8.8] con las correspondientes estimaciones de los parámetros de la tabla 8.2):

$$v = 4,851 \cdot 10^{-5} \cdot d^{1,883} \cdot h^{1,004} \quad [10.4]$$

El volumen total de los pies de la parcela que se muestra como ejemplo es de 7,34 m³/parcela (233,6 m³/ha).

Sabiendo que el BEF para *Pinus radiata* es de 0,44 (tabla 10.5), la biomasa aérea del rodal es $0,44 \cdot 233,6 = 102,8$ t/ha. Asimismo, teniendo en cuenta que el contenido medio en carbono de la biomasa aérea para esta especie es del 51,3% (tabla 10.4), el carbono acumulado resulta $102,8 \cdot 0,513 = 52,7$ t/ha.

Como se puede comprobar, los tres métodos arrojan resultados similares, si bien las estimaciones realizadas a partir de las ecuaciones de biomasa de árbol individual son más precisas que las realizadas a partir de las ecuaciones de rodal, y ambas son más fiables que las realizadas mediante los factores de expansión de biomasa.

10.6. Bibliografía

- Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R., Rojo, A. 2007. Resolución de problemas de ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. Cuadernos de la SECF 23, 35-42.
- Balboa-Murias, M.A. 2005. Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Ait., *Eucalyptus globulus* Labill. y *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Balboa-Murias, M.A., Álvarez González, J.G., Merino, A., Barrio-Anta, M. 2004a. Revisión y discusión metodológica para la determinación de la biomasa forestal. Cuadernos de la SECF 18, 35-39.
- Balboa-Murias, M.A., Rojo, A., Barreiro-Díaz, M.A., Montero, G. 2004b. CO₂ fixation by aerial and root biomass in *Pinus radiata* D.Don plantations in Galicia (NW Spain). The Economics and management of High Productivity Plantations. International IUFRO Meeting. Lugo, 27-30 september 2004.
- Balboa-Murias, M.A., Rojo, A., Cela, M.C., Montero, G. 2005. Cuantificación del potencial de *Betula alba* L. para el almacenamiento de carbono a medio y largo plazo en Galicia. IV Congreso Forestal Nacional. Zaragoza, 26-30 septiembre de 2005.
- Balboa-Murias, M.A., Rojo, A., Álvarez González, J.G., Merino, A. 2006a. Carbon and nutrient stocks in mature *Quercus robur* L. stands in NW Spain. Ann. For. Sci. 63(5), 557-565.
- Balboa-Murias, M.A., Rodríguez Soalleiro, R., Merino, A., Álvarez González, J.G. 2006b. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiate pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. For. Ecol. Manage. 237, 29-38.
- Balboa-Murias, M.A., Álvarez González, J.G., Rodríguez Soalleiro, R., Merino, A. 2006c. Estimación da biomasa arbórea de especies forestais galegas. II Xornadas de difusión de resultados de investigación. Xunta de Galicia.
- Barreiro Díaz, M.A. 2003. Estimación de la biomasa y cuantificación del potencial de *Pinus radiata* para el almacenamiento de carbono a medio y largo plazo en Galicia. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Barrio-Anta, M., Balboa-Murias, M.A., Castedo-Dorado, F., Diéguez-Aranda, U., Álvarez González, J.G. 2006. An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). For. Ecol. Manage. 223(1-3), 24-34.
- Brañas, J., González-Rio, F., Rodríguez Soalleiro, R., Merino, A. 2000. Biomasa maderable y no maderable en plantaciones de eucalipto. Cuantificación y estimación. Revista CIS-Madera 4, 72-75.
- Castedo-Dorado, F., Crecente-Campo, F., Álvarez-Álvarez, P., Barrio-Anta, M. 2009. Development of a stand density management diagram for radiate pine stands including assessment of stand stability. Forestry 82, 1-16.
- Cela, M.C. 2004. Estimación de la biomasa y cuantificación del potencial de *Quercus robur* L. y *Betula alba* L. para el almacenamiento de carbono a medio y largo plazo en Galicia. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Chiyenda, S.S., Kozak, A. 1984. Additivity of component biomass regression equations when the underlying model is linear. Can. J. For. Res. 14, 441-446.

- FAO. 2001. Global forest resource assessment 2000. FAO Forestry Paper 14 FAO, Rome.
- Fernández-Rivas, E. 2008. Elaboración de ecuaciones de estimación de biomasa arbórea para plantaciones de *Eucalyptus nitens* Deane Maiden en Galicia. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- Harvey, A.C. 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44, 461-465.
- Kozak, A. 1970. Methods for ensuring additivity of biomass components by regression analysis. *For. Chron.* 46(5), 402-404.
- Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R., Liski, J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *For. Ecol. Manage.* 188, 211-224.
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA, Serie Forestal, nº 13.
- Pardé, J. 1980. Forest biomass. *For. Abstr.* 41, 343-362.
- Parresol, B.R. 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45(4), 573-593.
- Parresol, B.R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Can. J. For. Res.* 31, 865-878.
- Rodríguez Soalleiro, R., Balboa-Murias, M., Álvarez González, J.G., Merino, A. 2007. Evaluation through a simulation model of nutrient exports in fast-growing southern European pine stands in relation to thinning intensity and harvesting operations. *Ann. For. Sci.* 64 (4), 375-384.
- Snowdon, P. 1985. Alternative sampling strategies and regression models for estimating forest biomass. *Aust. For. Res.* 15, 353-366.
- Unión Europea. 1999. Inventario de Emisiones de gases de efecto invernadero de España. Años 1990-2002. Comunicación a la Comisión Europea (Decisión 1999/296/CE).
- Vega Alonso, P., Vega Alonso, G., González Rosales, M., Rodríguez San José, A. 1993. Mejora del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. I Congreso Forestal Español, 14-18 de junio de 1993, Lourizán, Pontevedra. pp. 129-134. Tomo II.
- Xunta de Galicia. 2001. O monte galego en cifras. Dirección Xeral de Montes e Medio Ambiente Natural. Santiago de Compostela.

Anexo I. Abreviaturas y notación

I.1. Abreviaturas

Las abreviaturas empleadas en este libro han sido:

- ADA = metodología para obtener ecuaciones dinámicas en diferencias algebraicas, del inglés *Algebraic Difference Approach*.
- BAI = invarianza con respecto a la edad de referencia, del inglés *Base Age Invariance*.
- BEF = factor de expansión de biomasa, del inglés *Biomass Expansion Factor*.
- CCF = sistemas de gestión de cubierta forestal continua, del inglés *Continuous Cover Forestry*.
- CIF = Centro de Investigaciones Forestales.
- EPS = Escuela Politécnica Superior de Lugo.
- GADA = generalización de la metodología para obtener ecuaciones dinámicas en diferencias algebraicas, del inglés *Generalized Algebraic Difference Approach*.
- IFIE = Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias.
- INIA = Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- RFM = sistemas de gestión forestal de turno de corta, del inglés *Rotation Forest Management*.
- USC = Universidad de Santiago de Compostela.
- UXFS = Unidad de Gestión Forestal Sostenible, grupo de investigación de la USC, del gallego *Unidade de Xestión Forestal Sostible*.

I.2. Notación

La Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal (IUFRO) elaboró un documento para la normalización de símbolos en las mediciones forestales, que se discutió y aprobó en el congreso celebrado en Oxford en julio de 1956 y, después de pequeñas modificaciones, se publicó en 1959 en inglés, francés y alemán (Soest et al., 1959). En el libro de Diéguez-Aranda et al. (2003) se incluye una traducción al castellano.

La normalización de símbolos pretende hacer lo más sencilla posible la comprensión de lo que los autores quieren decir, particularmente cuando un texto está escrito en una lengua extranjera para el lector. Para conseguir este objetivo y para dar difusión a esta importante iniciativa, se han procurado adoptar a lo largo de este texto las recomendaciones recogidas en el mencionado

documento, aunque también se han tenido en cuenta las consideraciones apuntadas por Diéguez-Aranda et al. (2003) acerca de determinadas abreviaturas y términos empleados frecuentemente en español. Además, los símbolos se han denotado en cursiva en el texto para facilitar la lectura.

A continuación se muestra la notación general empleada en todo el libro; las notaciones específicas no incluidas en este listado, así como las variaciones en las unidades reseñadas, se indican en el apartado correspondiente del propio texto:

$$BALMOD = BAL/(G \cdot IH), \text{ índice de competencia, donde } BAL = \frac{\pi \cdot 10.000}{4 \cdot s} \cdot \sum d_{mi}^2, \text{ siendo } IH$$

el índice de Hart-Becking en tanto por uno asumiendo una distribución de los árboles a marco real (ver apartado 3.3.3), H_0 = altura dominante (m, ver apartado 2.1.6), N = número de pies por hectárea, s = superficie de la parcela (m^2), d_{mi} = diámetro normal (cm) de los árboles más gruesos que el árbol i .

$BAR = 100 \cdot g/G$, ratio, en porcentaje, entre la sección normal del árbol g (m^2) y el área basimétrica del rodal G (m^2/ha).

C_c = crecimiento corriente¹ del rodal ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$).

cc = concentración de carbono en la materia seca (%).

cl = longitud de copa (m), definida como la distancia entre el ápice del árbol y la base de la copa viva (ver definición de h_{bic}).

C_m = crecimiento medio¹ del rodal ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$).

d = diámetro normal con corteza (a 1,3 m sobre el nivel del suelo medidos desde la parte superior de la ladera, cm).

\bar{d} = diámetro medio aritmético del rodal (cm).

d_0 = diámetro dominante del rodal (cm), definido como el diámetro medio aritmético de los 100 árboles más gruesos (de mayor diámetro normal) por hectárea (ver apartado 2.1.6).

d_g = diámetro medio cuadrático del rodal (cm).

d_i = diámetro del tronco con corteza (cm) a la altura h_i .

d_{st} = diámetro del tocón con corteza (cm).

Δ = tamaño o amplitud de una clase diamétrica (cm).

g = sección normal del árbol (cm^2).

G = área basimétrica del rodal (m^2/ha), obtenida como la suma de las secciones normales de todos los árboles que hay en una hectárea.

G_{CD} = área basimétrica de una determinada clase diamétrica (m^2/ha) definida por su diámetro centro de clase CD .

h = altura total del árbol (m).

\bar{h} = altura media aritmética (m) del rodal.

H_0 = altura dominante¹ del rodal (m); aunque existen muchas definiciones de altura dominante, en este libro se ha considerado la media de las alturas de los 100 árboles más gruesos (de mayor diámetro normal) por hectárea (ver apartado 2.1.6).

h_{blc} = altura de la base de la copa viva (m), definida como la altura desde el suelo a la que se encuentra la inserción en el tronco del primer verticilo que contiene acículas vivas y forma parte de la copa como un conjunto.

h_i = altura (m) sobre el nivel del suelo hasta el punto en el que el diámetro es d_i .

h_{st} = altura del tocón (m).

i = crecimiento anual de un árbol.

IC = índice de competencia de árbol individual.

i_g = crecimiento anual en sección normal del árbol (cm²).

i_h = crecimiento anual en altura del árbol (m).

IH = índice de Hart-Becking (%), definido como el cociente entre el espaciamiento medio de los árboles de un rodal y su altura dominante: $IH (\%) = k \cdot \frac{100}{\sqrt{N} \cdot H_0} \cdot 100$

La constante k es igual a 1 si se asume una distribución de los árboles en marco real o malla cuadrada (típica de plantaciones), o igual a $(4/3)^{0,25}$ si se asume una distribución al tresbolillo o triangular (aplicada habitualmente a rodales naturales).

i_p = crecimiento potencial anual de un árbol.

IS = índice de sitio (m), definido como el valor de la altura dominante (m) a una determinada edad de referencia (años) para un rodal regular de una determinada especie.

k = $\pi/40.000$, factor para transformar diámetros al cuadrado (cm²) en secciones (m²).

l_{cd} = diámetro máximo de copa (m).

N = número de árboles por hectárea.

N_{CD} = número de árboles de una determinada clase diamétrica definida por su diámetro centro de clase CD .

N_d = número de árboles de un determinado diámetro d .

P_s = probabilidad de supervivencia anual de un árbol (tanto por uno).

q = h_i/h .

$R_{BA-D} = (g/G)^{(d/d_g)}$, ratio entre la sección normal del árbol g (m²) y el área basimétrica del rodal G (m²/ha) elevado al cociente entre el diámetro normal del árbol d (cm) y el diámetro medio cuadrático del rodal d_g (cm).

T = turno de corta (años) de un rodal forestal regular.

t = edad (años).

¹ Aunque según IUFRO (1959) se recomienda utilizar una notación distinta para denotar esta variable, en este libro se ha optado por emplear la notación más habitualmente empleada en España.

- t_{ref} = edad base o de referencia (años) a la que se asocia el índice de sitio en las ecuaciones de calidad de estación.
- V = volumen total del rodal con corteza (m^3/ha) en un momento determinado.
- v = volumen del tronco con corteza (m^3) desde la altura del tocón hasta el ápice del árbol.
- V_{eac} = volumen del rodal con corteza (m^3/ha) extraído acumulado en las distintas claras.
- v_i = volumen del tronco con corteza (m^3) desde la altura del tocón hasta el punto en el que el diámetro es d_i .
- V_i = volumen del rodal con corteza (m^3/ha) hasta un determinado diámetro en punta delgada d_i en un momento dado.
- V_t = volumen total del rodal con corteza (m^3/ha), obtenido como suma del correspondiente a la masa principal después de la última clara más el acumulado en las claras precedentes.
- W = biomasa arbórea aérea total del rodal (t/ha) en un momento determinado.
- w = biomasa aérea total del árbol (kg), correspondiente a la suma de la biomasa de las distintas fracciones de la parte aérea.
- w_w = biomasa de madera contenida en el fuste del árbol (kg), correspondiente a la parte del tronco desde la altura del tocón hasta 7 cm de diámetro con corteza en punta delgada.
- w_b = biomasa de corteza contenida en el fuste del árbol (kg), correspondiente a la parte del tronco hasta 7 cm de diámetro con corteza en punta delgada.
- w_{b7} = biomasa de madera y corteza de las ramas del árbol que tienen un diámetro mínimo en punta delgada de 7 cm (kg).
- w_{b2-7} = biomasa de madera y corteza de las ramas del árbol que tienen un diámetro máximo en punta gruesa de 7 cm y mínimo en punta delgada de 2 cm (kg).
- $w_{b0,5-2}$ = biomasa de madera y corteza de las ramas del árbol que tienen un diámetro máximo en punta gruesa de 2 cm y mínimo en punta delgada de 0,5 cm (kg).
- $w_{b0,5}$ = biomasa de madera y corteza de las ramas del árbol que tienen un diámetro máximo en punta gruesa de 0,5 cm (kg).
- w_l = biomasa de hojas del árbol (kg); bajo este término se incluyen tanto las hojas de las frondosas caducifolias como las acículas de las coníferas y los filodios de los eucaliptos.
- w_r = biomasa de raíces del árbol (kg).
- w_{db} = biomasa de ramas secas del árbol (kg), correspondiente a la madera y la corteza de las ramas muertas que se sitúan a lo largo del fuste del árbol pero no forman parte de la copa como tal (especialmente de importancia para especies como *Eucalyptus nitens*).

I.3. Bibliografía

- Diéguez-Aranda, U., Barrio-Anta, M., Castedo-Dorado, F., Ruiz González, A.D., Álvarez-Taboada, M.F., Álvarez González, J.G., Rojo, A. 2003. Dendrometría. Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Soest, J.v., Ayrál, P., Schober, R. Hummel, F.C. 1959. Recommendations on the standardization of symbols in forest mensuration. IUFRO.

Anexo II. Comparación, selección y validación de modelos

En el proceso de construcción de modelos es habitual emplear diferentes expresiones matemáticas y/o distintas metodologías de ajuste para obtener la relación entre una variable dependiente y otra o más variables independientes. Por tanto, es imprescindible contar con algún procedimiento que permita determinar cuáles de esas expresiones y/o metodologías son las más adecuadas para los objetivos del modelo. Eso es lo que se denomina comparación y selección de modelos.

Por otro lado, una de las principales utilidades de los modelos forestales es predecir el desarrollo futuro de un rodal o árbol concreto no utilizado en la construcción del modelo, por lo que es fundamental que las predicciones sean fiables. El procedimiento de evaluación de la fiabilidad de dichas predicciones es lo que se denomina validación de un modelo.

Tanto la comparación y selección de modelos como la validación de un modelo se basan en evaluaciones cualitativas y cuantitativas. En el primer caso, el objetivo es analizar si cada ecuación o componente del modelo por separado, y el conjunto de ecuaciones o componentes que constituyen el modelo como un todo, tienen un comportamiento lógico. Por su parte, el objetivo de la evaluación cuantitativa es caracterizar los errores del modelo (diferencias entre el valor real medido y el que estima el modelo) en términos de su magnitud y distribución.

En los trabajos en los que se han desarrollado la mayoría de ecuaciones que se presentan en este libro, así como en las ecuaciones desarrolladas específicamente para el mismo, se ha tenido especial cuidado en la evaluación cualitativa de los modelos. La selección del mejor modelo debe tener en cuenta lo que se conoce sobre las relaciones entre la variable a explicar y la variable o las variables independientes, lo que se utilizará para construir un modelo coherente, a no ser que se pueda demostrar que el conocimiento inicial era erróneo (Peña, 2002).

La caracterización de los errores de la evaluación cuantitativa se basa habitualmente en el empleo de estadísticos de bondad del ajuste y en el análisis gráfico de los residuos (valor real menos valor estimado por el modelo). Los estadísticos que se han empleado para cuantificar la bondad de las estimaciones han sido el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error medio cuadrático (REMC).

Aunque existen opiniones fundamentadas que plantean dudas en relación con el empleo del R^2 en la selección de modelos, este estadístico da una idea bastante intuitiva de la variabilidad que explican (expresada en tanto por uno y siendo lógicamente 1 el valor máximo que puede tomar); no obstante, nunca debe utilizarse como el único criterio para elegir el modelo que mejor predice entre un conjunto de modelos candidatos (Myers, 1990). Además, pese a los

inconvenientes asociados al uso del R^2 en regresión no lineal, la utilidad general de emplear alguna medida de la adecuación global del modelo supera dichas limitaciones (Ryan, 1997).

Por otra parte, el estadístico REMC resulta útil porque está expresado en las mismas unidades que la variable dependiente, por lo que da una idea del error medio que se comete con el modelo, además de que penaliza los modelos con mayor número de parámetros, de acuerdo con el principio general de simplicidad científica.

Las expresiones de estos estadísticos son las siguientes:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \bar{Y})^2} \quad [1]$$

$$\text{REMC} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}} \quad [2]$$

donde Y_i , \hat{Y}_i e \bar{Y} son respectivamente los valores observado, estimado y promedio de la variable dependiente, n es el número total de observaciones utilizado para ajustar el modelo y p es el número de parámetros a estimar. Evidentemente, cuanto mayor sea el valor del coeficiente de determinación R^2 y menor sea el valor del estadístico REMC, mayor será la exactitud del modelo.

En cuanto al análisis visual, se han empleado los gráficos que representan los residuos frente a los valores estimados, y los que representan los residuos frente a las variables independientes. Los primeros sirven para comprobar las hipótesis de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de errores que se asumen al ajustar una relación empleando regresión por el método de mínimos cuadrados. Los segundos permiten analizar si existe alguna tendencia que pueda indicar una relación entre variables que no haya sido tomada en cuenta en el modelo.

Por último, debido a que la bondad del ajuste no refleja necesariamente la bondad de una predicción futura (Myers, 1990), es recomendable realizar una validación del modelo con un conjunto independiente de datos (Kozak y Kozak, 2003). Generalmente no se dispone de datos independientes, por lo que se han propuesto varios métodos alternativos, como dividir la muestra en dos conjuntos y utilizar una para el ajuste y otra para la validación o realizar una doble validación cruzada, aunque raramente proporcionan información adicional en comparación con los estadísticos obtenidos directamente de los modelos ajustados con todo el conjunto de datos (Kozak y Kozak, 2003). Por tanto, ya que las decisiones hay que tomarlas con la información disponible, y considerando que la validación de un modelo sólo se puede realizar mediante su empleo a lo largo del tiempo, parece mejor esperar a obtener nuevos datos antes de llevar a cabo dicha validación.

II.1. Bibliografía

- Kozak, A., Kozak, R.A. 2003. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? *Can. J. For. Res.* 33, 976-987.
- Myers, R.H. 1990. *Classical and modern regression with applications*. 2nd edition. Duxbury Press, Belmont, California.
- Peña, D. 2002. *Regresión y diseño de experimentos*. Alianza Editorial, Madrid.
- Ryan, T.P. 1997. *Modern regression methods*. John Wiley & Sons, New York.

Anexo III. Resumen de herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia

En la tabla III.1 se relacionan las diferentes herramientas selvícolas disponibles en este libro para cada especie, indicando el capítulo donde pueden consultarse y el archivo o programa del CD-ROM en el que están implementadas.

Tabla III.1. Resumen de herramientas selvícolas para la gestión sostenible de las principales especies forestales de Galicia.

Herramienta	<i>B.a.</i>	<i>E.g.</i>	<i>E.n.</i>	<i>P.p.</i>	<i>P.r.</i>	<i>P.s.</i>	<i>P.m.</i>	<i>Q.r.</i>
Curvas de calidad de estación (capítulo 2, archivo 02_CE.xls)	X	X		X	X	X	X	X
Tablas de producción (capítulo 3, archivo 03a_TP.xls)	X						X	X
Diagrama de manejo de la densidad (capítulo 3, archivo 03b_DMD.pdf)	X						X	X
Modelo dinámico de crecimiento (capítulo 4, programa GesMO® 2009)				X	X	X		
Modelo de árbol individual (capítulo 5)					X			
Distribución diamétrica (capítulo 6, archivo 06_DD.xls)	X			X	X	X	X	X
Relación <i>h-d</i> generalizada (capítulo 7, archivo 07_HDG.xls)		X		X	X	X	X	X
Herramientas de cubicación de árbol individual, con y sin clasificación de productos (capítulo 8, archivo 08_TCCP.xls)		X		X	X	X	X	X
Ecuación de volumen y diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón (capítulo 9, archivo 09_TOC.xls)	X	X		X	X	X		X
Ecuación de biomasa de árbol individual (capítulo 10, archivo 10_BIO.xls)	X	X	X	X	X	X		X
Ecuación de biomasa de rodal (capítulo 10)				X	X			
Factor de expansión de biomasa (capítulo 10)	X	X	X	X	X	X		X
Contenido de carbono (capítulo 10)	X	X	X	X	X	X		X

Nota: *B.a.* = *Betula alba*; *E.g.* = *Eucalyptus globulus*; *E.n.* = *Eucalyptus nitens*; *P.p.* = *Pinus pinaster*; *P.r.* = *Pinus radiata*; *P.s.* = *Pinus sylvestris*; *P.m.* = *Pseudotsuga menziesii*; *Q.r.* = *Quercus robur*.



XACOBEO 2010
Galicia



XUNTA
DE GALICIA