

Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia

F. Sánchez^{1*}, R. Rodríguez¹, A. Rojo², J. G. Álvarez²,
C. López², J. Gorgoso² y F. Castedo²

¹ Departamento de Producción Vegetal. ² Departamento de Ingeniería Agroforestal.
Escuela Politécnica Superior. E-27002 Lugo. España

Resumen

En este trabajo se exponen modelos de crecimiento y producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia a partir de una sola medición de parcelas de inventario, y del análisis de troncos de árboles dominantes y árboles tipo. Se obtiene un modelo de curvas de calidad de estación polimórfico y tres tipos diferentes de tablas de producción para otras tantas posibles evoluciones de la densidad de las parcelas. El turno de máxima renta en especie varía entre 28 y 44 años, y el crecimiento medio de la masa principal a los 30 años entre 8,1 y 19,8 m³/ha·año. Se estima la producción maderable según el volumen a diferentes valores estándar del diámetro final con corteza y se comparan las alternativas desde un punto de vista productivo.

Palabras clave: *Pinus radiata*, calidad de estación, modelos de crecimiento y producción, tablas de producción, selvicultura, Galicia.

Abstract

Growth models and yield tables for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (northwest of Spain)

In this paper, growth models and yield tables for *Pinus radiata* D. in Galicia (northwest of Spain) are shown. These models were obtained from the measurement of 175 permanent sample plots, stem analyses of dominant trees and index trees. Polymorphic site index curves and three different types of yield tables corresponding to other three possible stand density evolutions are obtained. Optimal biomass rotations range from 28 to 44 years, and mean annual increment varies from 8.1 to 19.8 m³ ha⁻¹ year⁻¹ at 30 years, depending on site index. Wood productions to different standard diameters are estimated, and alternative silvicultural regimes are discussed.

Key words: *Pinus radiata*, site index curves, growth and yield models, yield tables, silviculture, Galicia.

Introducción

Pinus radiata D. Don es la tercera especie forestal en importancia en Galicia, muy por detrás de *Eucalyptus globulus* Labill. y *Pinus pinaster* Ait., tanto por su extensión superficial como por el volumen de cortas de madera que genera su aprovechamiento. Sin embargo, a diferencia de *Eucalyptus globulus* Labill., su madera va destinada casi en su totalidad a la industria forestal gallega de aserrío y del tablero, deficitarias en la actualidad de materia prima de calidad como consecuencia de la progresiva sustitución de masas de *P. pinaster* Ait. por plantaciones o regeneraciones espontáneas de eucalipto.

El Tercer Inventario Forestal Nacional señala que Galicia cuenta con 89.915 ha arboladas de *Pinus radiata* D. Don con fracción de cabida cubierta superior al 20%, si bien se reconoce que únicamente 59.198 revisten cierta entidad superficial, donde la especie es dominante (D.G.C.N., 2000; Xunta de Galicia, 2001).

A pesar de ello, una gran parte de los propietarios forestales se siente inclinada a elegir esta especie como medio de reforestar tierras agrarias, debido a un crecimiento moderadamente rápido de la especie y a la versatilidad de su madera, apta para distintos usos industriales.

Dada su importancia maderera, son muchos los antecedentes existentes en modelos de producción y crecimiento de esta especie. En países donde *Pinus radiata* D. Don es de gran trascendencia en la economía forestal (Nueva Zelanda, Chile, etc.), ya existen pro-

* Autor para la correspondencia: fesan@lugo.usc.es
Recibido: 23-05-02; Aceptado: 10-03-03

gramas informáticos de gestión de las plantaciones, implicando no sólo aspectos productivos, sino también de evaluación financiera, valoración forestal, calidad de las trozas y del aserrado, etc. (Maclaren, 1993).

Ampliar el conocimiento que se tiene de las posibilidades productivas y de la selvicultura de *Pinus radiata* D. Don es un objetivo prioritario de la investigación forestal en la Cornisa Cantábrica desde hace décadas, donde diversos estudios, principalmente ubicados en el País Vasco, han ido desarrollando modelos de crecimiento y producción de la especie a partir de la medición de parcelas de inventario (Echeverría y De Pedro, 1956; Madrigal y Toval, 1975; Cantero *et al.*, 1995, etc.).

El primer trabajo español referido a la especie fue publicado por Echeverría (1942), que elaboró unas tablas de producción de existencias normales, es decir de espesura completa, buscando una utilización del espacio total y la máxima producción. Se instalaron y midieron 41 parcelas en 16 sitios de ensayo, para probar espaciamentos diferentes, distribuidos en Guipúzcoa, Vizcaya, Santander y Pontevedra. Los inventarios tuvieron lugar durante 10 años en algunas parcelas, lo que permitió realizar ajustes gráficos de la evolución de las variables de interés. Las tablas comprenden un rango de edades de 7 a 25 años, con cinco calidades definidas por la altura media y un régimen de claras moderado para garantizar la máxima producción. Estas tablas, según Madrigal (1991), perdieron pronto vigencia al ampliarse enormemente la superficie repoblada con *Pinus radiata* D. Don, lo que incluía gran diversidad de condiciones de estación y marcos de plantación.

Posteriormente Madrigal y Toval (1975) construyen unas tablas de producción para el País Vasco con una red de 53 parcelas temporales. Se trata de tablas válidas para un rango de edades de 5 a 35 años, definiéndose tres calidades de estación mediante curvas de crecimiento de la altura dominante. Son tablas de selvicultura media observada, es decir, de la que realmente se llevaba a cabo cuando se realizaron las mediciones. El régimen de claras es más fuerte que el anterior, lo que evidencia un destino final de aserrado. A este respecto, Madrigal (1992), ateniéndose al mercado de madera en el País Vasco, aconseja su revisión intensificando las claras para orientar la producción exclusivamente a madera gruesa.

También para el País Vasco, Castilla y Prieto (1992) elaboraron un simulador de la producción de masas de esta especie a partir de las tablas de selvicultura

media anteriores y de datos de ocho parcelas permanentes establecidas por la Diputación Foral de Guipúzcoa. Este trabajo permite obtener tablas de selvicultura de referencia, información de distribuciones diamétricas, clasificación de productos y rentabilidad de los turnos.

Recientemente se ha elaborado un simulador del crecimiento en el ámbito vasco (Cantero *et al.*, 1995; Espinel *et al.*, 1997). Para ello se partió del inventario forestal de País Vasco del año 1986, y se remidieron 30 de sus parcelas entre 1993 y 1994. También se contó con 30 parcelas permanentes establecidas por la Diputación Foral de Guipúzcoa en 1988 tratadas con distintos regímenes de claras. El modelo permite simular el crecimiento de un rodal regular desde cualquier edad y con distintos pesos de claras por lo bajo. Los resultados ofrecen la tabla de la evolución de la masa según los tratamientos elegidos, así como la distribución diamétrica a cualquier edad.

El cálculo de simuladores de crecimiento es un paso posterior a los objetivos de este trabajo, que sólo emplea una medición de las parcelas instaladas. Sin embargo, la elaboración de modelos estáticos conducentes a la descripción sintética de la evolución de las masas mediante tablas de producción tiene inmediatas aplicaciones en la planificación y gestión forestal, entre las que puede citarse (Madrigal *et al.*, 1999):

- La determinación de los turnos, tanto de máxima renta en especie como tecnológicos y financieros.
- La evaluación de la productividad de la estación referida a la especie considerada.
- La descripción del estado selvícola de las masas forestales de la especie si se dispone de una red de parcelas suficientemente representativa.
- La discusión de óptimos regímenes selvícolas dentro de los márgenes del modelo calculado.
- La estimación rápida del volumen y crecimiento de una masa o de un rodal.
- El estudio del grado de adecuación de la evolución de las masas con modelos disponibles.

De lo referido, se deduce que para Galicia no existen casi referencias que orienten al planificador o gestor forestal en su tarea, por lo que es indispensable iniciar los estudios que provean de un conocimiento suficientemente amplio del comportamiento de esta especie en el noroeste peninsular.

El modelo a construir puede considerarse un caso especial de tablas de producción de selvicultura variable, con la salvedad de que los datos no proceden de lugares de ensayos de claras sino de una agrupación

práctica de las parcelas por su similitud en cuanto a la evolución de su densidad. No hay una certeza absoluta de la equivalencia en los tratamientos aplicados a las parcelas de cada clase, pero sí de que su proximidad garantiza una alta probabilidad de haber sido sometidas al mismo tipo de selvicultura. Por lo demás, el sistema de construcción es idéntico al de las tablas de selvicultura media.

Material y métodos

Datos utilizados

Instalación e inventario de parcelas

Los estudios de crecimiento y producción llevan aparejados, entre otras medidas, la instalación y medición de parcelas permanentes, de intervalo o temporales de inventario de las masas forestales que se desean describir. Aunque para describir la evolución de las masas se sigue una metodología basada en un inventario único, se ha optado por instalar parcelas de intervalo porque se desea repetir posteriormente las tomas de datos con el fin de construir un modelo dinámico que permita analizar con precisión diversas opciones de selvicultura (Gadow *et al.*, 1999).

En la selección de parcelas se ha pretendido conseguir una muestra representativa de edades, densidades y calidades de estación de las masas forestales gallegas de *Pinus radiata* D. Don. La preselección ha sido posible estimando la edad, mediante encuesta del año de plantación o conteo de crecimientos anuales, la densidad, con el espaciamiento medio existente (reflejo de la selvicultura efectuada), y el índice de sitio, calculado a través de una medida preliminar de la altura dominante y de las curvas de calidad vascas disponibles (Madrigal y Toval, 1975).

Para la densidad se ha tomado como guía la calidad II de las tablas de producción del País Vasco (Madrigal y Toval, 1975), y se han clasificado las parcelas por la sintonía de la evolución de su espesura respecto a la que tendrían según dicha calidad intermedia. Así, se han establecido seis tipos (+1, 0, -1, -2, -3, y -4), según se haya detectado un adelanto (con signo positivo), o un retraso (negativo) en el número de claras prescritas para esa calidad intermedia.

En el caso del índice de sitio se han podido clasificar las parcelas según las clases de calidad provisionales definidas por los valores de la altura dominante

Tabla 1. Distribución de las parcelas por clases de calidad y de concordancia con la densidad de la calidad II de las tablas del País Vasco

Calidad	Tipo de concordancia con clase II vasca						Total
	+1	0	-1	-2	-3	-4	
Clase I	0	5	7	4	0	2	18
Clase II	1	22	23	21	5	1	73
Clase III	3	9	21	14	10	4	61
Clase IV	1	3	4	6	9	0	23
Total	5	39	55	45	24	7	175

a la edad de 20 años que se indican: clase IV de índice de sitio (altura dominante a los 20 años, en adelante S) menor a 15 m; clase III con S entre 15 y 19 m; clase II, entre 19 y 23 m, y clase I, mayor que 23 m.

Para la edad se incluyó cada parcela en uno de los tres intervalos siguientes: de 10 a 19 años; de 20 a 29, y de 30 a 39 años.

Las Tablas 1 y 2 reflejan, respectivamente, la distribución de las cuatro clases de calidad referidas con los tipos de densidad y con las tres clases de edad asignadas a las 175 parcelas que tenían, al menos, 10 años. Como puede apreciarse, existe un amplio abanico de esquemas de selvicultura que se encuentran repartidos por todo el rango de variación del índice de sitio. La red de parcelas representa bien estos diferentes esquemas y la diversidad de calidades de estación a las edades disponibles. Como suele ocurrir en esta clase de trabajos, las mejores calidades tienen menor presencia a edades maduras, ya que estos rodales suelen cortarse antes.

También se cubrió completamente el territorio gallego donde se ha repoblado esta conífera a excepción de ubicaciones hoy marginales, áreas de montaña (de altitud elevada, por encima de 900 m), o localizaciones cuya precipitación media anual es menor a 900 mm.

Tabla 2. Distribución de las parcelas según su clase de edad e índice de sitio

Calidad	10 a 19	20 a 29	30 a 39	Total
Clase I	12	4	2	18
Clase II	40	17	16	73
Clase III	22	20	19	61
Clase IV	4	5	14	23
Total	78	46	51	175

Tabla 3. Distribución por provincias de los porcentajes de pies mayores, menores y totales de *Pinus radiata* D. Don en Galicia, según el Tercer I.F.N. (D.G.C.N., 2000), y de las parcelas instaladas para estudiar el crecimiento y la producción de la especie

Provincia	% sobre pies menores	% sobre pies mayores	% sobre pies totales	Parcelas
A Coruña	18,10	15,95	16,50	51 (29,14%)
Lugo	74,53	79,68	78,35	120 (68,57%)
Ourense	2,53	2,32	2,38	0 (0%)
Pontevedra	4,84	2,05	2,77	4 (2,29%)

Según los datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (D.G.C.N., 2000), Lugo contiene las tres cuartas partes de los pies mayores (de clase diamétrica mayor o igual a 20 cm), y casi el 80% de los menores respecto al total de los estimados. Las provincias del sur, Pontevedra y Ourense, tienen una pequeña porción cada una del total de los pies estimados (Tabla 3).

La red de experimentación consta de 175 parcelas distribuidas mayoritariamente en la provincia de Lugo (120), seguida de A Coruña (51), y de únicamente cuatro en la de Pontevedra. La provincia de A Coruña obtiene una representación mayor comparada con el porcentaje de sus pies, ya que se ha tenido en cuenta la mayor dispersión y heterogeneidad de sus masas sobre el territorio. En las provincias del sur se ha optado por instalar sólo cuatro parcelas en la Sierra de Oia (Pontevedra), de gran influencia marítima, evitando las condiciones de mayor influencia mediterránea.

Las 175 parcelas se ubican en 26 ayuntamientos diferentes de ocho comarcas, tal y como se detalla a continuación:

— Comarca *Central Lucense* (incluido la de Sarria): 64 parcelas, de las que 7 se sitúan en Baralla, 12 en Castroverde, 4 en O Corgo, 16 en Friol, 5 en Guntín, 6 en Láncara, 12 en Lugo y 2 en Portomarín.

— *Terra Cha* lucense: 51 parcelas, distribuidas entre los ayuntamientos de Begonte (2), Castro de Rei (5), Guitiriz (25), Pastoriza (7), Pol (7), Vilalba (2) y Xermade (1).

— *Terra de Ulloa*, en Lugo: 7 parcelas, todas en el ayuntamiento de Monterroso.

— Comarca del *Ortegal* coruñés: 30 parcelas; de ellas 21 se encuentran en Cedeira, 4 en Ortigueira, 3 en Mañón y 2 en Cariño.

— Comarca de *Bergantiños* en A Coruña: 12 parcelas repartidas entre Carballo (4) y Coristanco (8).

— Comarca coruñesa de *Ordes*: 5 parcelas ubicadas en Tordoia.

— *Fisterra* o Finisterre: 4; 3 en Camariñas y 1 en Fisterra.

— *O Rosal* en Pontevedra: 4, todas en el ayuntamiento de Oia.

Para la instalación y medición se siguieron las recomendaciones realizadas por Madrigal *et al.* (1992) para la elaboración de las tablas de producción de *Fagus sylvatica* L. en Navarra. Las parcelas son rectangulares, de 550 a 1.200 m², con su lado menor siguiendo la línea de máxima pendiente y evitando que sus límites se expusieran a situaciones de borde de masa. En la elección del tamaño se tomó la precaución de que contuvieran un mínimo de 30 árboles. Generalmente las parcelas de edad inferior resultaron de menor superficie que las maduras, aunque casi todas superan holgadamente los 30 pies inventariables.

El replanteo de las parcelas se llevó a cabo con cinta métrica, escuadras ópticas y jalones, midiéndose posteriormente la pendiente con un Blume-Leiss, y la exposición y la altitud con la ayuda de planos topográficos a escala adecuada. Hecho el replanteo, se pasó a realizar el inventario diamétrico, para lo que se marcaron todos los pies pintándolos con una T invertida a la altura del pecho por la parte alta de la ladera, y se identificaron numerándolos con una chapa metálica previamente troquelada, que fue clavada en el tronco a mayor altura. Los diámetros normales de todos los pies superiores a 5 cm se midieron con forcípulas, en mm, en las dos direcciones de los lados perpendiculares de la parcela.

Una vez que fueron identificados los árboles dominantes, entendiendo por tales los 100 más gruesos por hectárea (Assmann, 1970), se midió su altura, con un hipsómetro Blume Leiss en los árboles maduros o con pértiga telescópica en las masas juveniles, hasta una aproximación de medio metro o un decímetro respectivamente. También se midió en cada parcela una muestra aleatoria de alturas de 30 árboles para poder estimar la altura media de la masa. Estos 30 árboles representan un elevado porcentaje de los existentes en casi todas las parcelas, por lo que la estimación de la altura media tiene una alta fiabilidad.

La edad se estimó tomando muestras en la base de cuatro árboles con una barrena Pressler y contando los anillos de crecimiento.

Análisis de troncos de árboles dominantes

La medición de la evolución temporal de la altura dominante es necesaria para la construcción de curvas de calidad de estación que reflejen la productividad forestal, también llamadas curvas de índice de sitio. El índice de sitio es el medio más usual para describir la productividad cuando se emplean características intrínsecas a las masas forestales (Ortega y Montero, 1988; Carmean y Lenthall, 1989).

Se acude al análisis de troncos de árboles dominantes cuando se carece de inventarios previos de parcelas que permitan describir su crecimiento en altura. Los árboles objeto del análisis de tronco fueron seleccionados en las proximidades de las parcelas de medición siguiendo la metodología expuesta para la elaboración de las curvas de calidad de *Fagus sylvatica* L. en Navarra (Madrigal *et al.*, 1992). Para ello, se calculó el diámetro medio de los árboles dominantes y su altura, y recorriendo desde el vértice oeste los alrededores de las parcelas en sentido de las agujas del reloj, se localizaron un par de pies que tuvieran una diferencia menor al 5% respecto a las medias de los diámetros y alturas dominantes de la parcela.

Dos fueron los criterios que se adoptaron con el fin de seleccionar los árboles a aprear; por un lado se deseaba que éstos fueran de la mayor edad posible, y por otro, era necesario abarcar todo el rango de índices de sitio hallado en las parcelas.

Debido a que no se dispuso de suficiente número de pies para aprear en las parcelas de inventario, se completaron los análisis de troncos con árboles dominantes elegidos en masas ajenas a la red de parcelas. Se analizaron un total de 164 árboles, empleándose finalmente 94 en la construcción de curvas de calidad, aquellos que contaban con 19 o más años de edad, con el fin de no cometer excesivos errores en la obtención del índice de sitio por interpolación o extrapolación de las mediciones efectuadas.

En las Tablas 4 y 5 se describen algunas características de la población de árboles dominantes empleados. La edad de los mismos alcanza los 41 años, con una media próxima a los 30, valor considerado en reiteradas ocasiones como turno a emplear en esta especie. El índice de sitio cubre bien la variación

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de la población de 94 árboles dominantes usados en la construcción de curvas de calidad de estación

	Mín	Máx.	Media	DE
Edad	19	41,0	30,4	6,86
Altura total	15,0	34,8	24,9	4,39
Índice de sitio	11,2	26,7	19,3	3,67

DE: desviación estándar.

medida en la red de parcelas, y se encuentra regularmente distribuido con la edad, a excepción de los árboles maduros de mejor calidad (índice de sitio mayor a 23 m).

Una vez cortados en trozas de 2,5, 2 y 1 m, se efectuaron los análisis de tronco de estos árboles dominantes mediante la enumeración de anillos de crecimiento en las secciones de corte y la medición de las longitudes y diámetros de dichas trozas en cm.

Las alturas fueron corregidas siguiendo las indicaciones de Carmean (1972), para solventar la subestimación que se produce por no coincidir el corte con el término de cada incremento en altura. Un estudio comparativo entre seis métodos de corrección de datos para análisis de troncos reveló que el algoritmo de Carmean es la mejor elección (Dyer y Bailey, 1987). Este método supone que cada corte se produce en el centro del incremento en altura. La desviación puede ser corregida incrementando la altura de la sección en la mitad de la longitud estimada del crecimiento anual, que se obtiene dividiendo la longitud de la troza por la diferencia en el número de anillos de sus secciones de corte.

Medición de árboles tipo para la construcción de tarifas de cubicación

Se ha considerado que los datos procedentes de los árboles dominantes no eran idóneos para la obtención de tarifas de cubicación de árboles en pie, como consecuencia de las probables diferencias existentes en el perfil medio de la población de dominantes respecto

Tabla 5. Árboles dominantes por clases de edad y de índice de sitio para construir las curvas de calidad de estación

	S ≤ 15	15 < S ≤ 19	19 < S ≤ 23	S > 23	Total
Edad ≤ 30	4	16	15	13	48
Edad > 30	9	14	20	3	46

Tabla 6. Estadísticos de las variables dasométricas de los 194 árboles tipo empleados en el cálculo de tarifas de árbol individual

Variable	Media	DE	Máx.	Mín.
d (cm)	27,0	13,4	57,1	5,1
h (m)	20,6	6,8	36,5	4,2
d ₄ (cm)	22,5	11,8	51,6	1,7
v ₇ (dm ³)	765	779	3.415	6,1
v _{7u} (dm ³)	662	668	2.972	5,4
Cor. %	13,2	4,0	31,9	6,6

DE: desviación estándar.

a otra cualquiera de la especie en la misma zona. Por ello, se ha acudido a la medición de árboles tipo.

Para conseguir los datos necesarios se han localizado cortas de masas de *Pinus radiata* D. Don dentro de la zona de estudio, habiéndose derribado, troceado y medido 194 árboles tipo de una amplia gama de diámetros y alturas. La población se considera de tamaño suficiente para tarifas de ámbito comarcal y regional.

Antes de que se apeara cada árbol se midió su diámetro y espesor de corteza a 1,30 m, y una vez que fueron derribados, se halló su altura total con la ayuda de una cinta métrica hasta una aproximación de 1 cm, así como el diámetro a 4 m de altura. Después de tronzados en dimensiones comerciales, generalmente 2,5 m, se procedió a medir y anotar los diámetros y espesores de corteza en dos direcciones perpendiculares de las secciones de corte, con aproximación de 1 mm, y hasta un diámetro en punta delgada de 7 cm. Para todas las mediciones de diámetros y espesores de corteza se emplearon forcípulas y calibradores de precisión suficiente. Para cubicar las trozas se utilizó la fórmula de Smalian.

En la Tabla 6 se muestran los valores de los estadísticos más comunes representativos de la población de árboles tipo empleada. La población cubre una amplia gama de valores, lo que proporciona gran validez a las ecuaciones que se hallen.

Tabla 7. Distribución de las parcelas por clases de densidad y de índice de sitio

	S > 23	19 < S ≤ 23	15 < S ≤ 19	S ≤ 15	Total
Clase A	5	21	20	11	57
Clase B	6	23	20	7	56
Clase C	7	29	21	5	62
Total	18	73	61	23	175

Construcción de las tablas de producción

Clasificación de parcelas

Representadas las parcelas en el diagrama cartesiano densidad frente a edad, se clasificaron en tres tipos mediante un análisis de componentes principales, atendiendo a la probable selvicultura efectuada en las mismas (Sánchez Rodríguez, 2001). La diferencia fundamental entre las clases estriba en el momento en el que se empieza a aclarar la masa desde densidades de plantación cercanas a 2000 pies/ha. La clase de densidad más alta (en adelante A), implica la realización de la primera corta intermedia entre los 15 y los 20 años, en la intermedia (B), se efectúa entre los 10 y los 15, y en la de menor densidad (C), se lleva a cabo un clareo antes de los 10 años. La distribución de las tres clases de parcelas establecidas por clases de índice de sitio y de concordancia con la selvicultura propuesta por Madridal y Toval (1975) se describen en las Tablas 7 y 8.

Procedimiento de cálculo de las tablas de producción

Para cada una de las cuatro clases de calidad establecidas para la especie en Galicia 13, 17, 21 y 25 m de altura dominante a los 20 años (Sánchez Rodríguez, 2001), se han construido tres tablas, una para cada una de las clases de parcelas consideradas. Para su elaboración se han seguido los pasos que a continuación se detallan:

Tabla 8. Distribución de las parcelas por clases de densidad y de concordancia con la selvicultura propuesta en la calidad II de las tablas del País Vasco

	Tipo +1	Tipo 0	Tipo -1	Tipo -2	Tipo -3	Tipo -4	Total
Clase A	0	0	3	24	23	7	57
Clase B	0	1	33	21	1	0	56
Clase C	5	38	19	0	0	0	62
Total	5	39	55	45	24	7	175

La primera variable a considerar en las tablas es la edad (t) en años, que puede tomar cualquier valor dentro del rango de los datos empleados, principalmente entre 10 y 40 años. Aunque algunas parcelas se sitúan fuera de este intervalo, su representación es escasa, por lo que no es prudente ampliar la representación de las variables fuera del mismo. Se ha considerado suficiente presentar los datos en intervalos de 5 años dentro del rango anterior (10 a 40 años).

La segunda variable a considerar es la altura dominante en metros (h_{dom}), que se determina de forma sencilla con la primera ecuación fundamental, $h_{dom}=f(t,S)$, a partir de la edad (t) y el índice de sitio en metros (S).

El cálculo de la densidad en número de pies por hectárea (N) se ha llevado a cabo, para cada clase de parcelas, con las ecuaciones que relacionan ésta con la edad y la altura dominante, $N=f(h_{dom}, t)$. La densidad extraída en cada edad (N_e) se ha calculado por diferencia entre la existente a la edad t y la respectiva a la edad $t+5$ siguiente. La densidad de la masa principal después de clara (N_p) es la diferencia entre N y N_e , por lo que coincide con N a los 5 años siguientes. La densidad extraída incluye la mortalidad natural entre dos edades, lo que debe ser tenido en cuenta al interpretar estas tablas.

A partir de la densidad de la masa principal antes de clara (N) y de la altura dominante (h_{dom}), es factible estimar la altura media de esta masa principal en metros (\bar{h}), mediante la entrada en la ecuación fundamental que las relaciona, $\bar{h}=f(h_{dom}, N)$.

La estimación del diámetro medio cuadrático en cm de la masa principal (d_g), para cada una de las tres clases de parcelas establecidas, es posible contando con las relaciones fundamentales $d_g=f(N, h_{dom}, S)$.

Los volúmenes maderables en m^3/ha de las masas principales antes de clara (V_7) se obtienen con la ecuación fundamental de masa, $V_7=f(G, h_{dom}, d_g)$, relación fundamental quinta.

El volumen maderable extraído (V_{7e}) se obtiene a partir del valor correspondiente de la relación entre los volúmenes medios unitarios de la masa extraída y de la masa antes de clara, $p=(V_{7e}/N_e)/(V_7/N)$. Teniendo en cuenta los valores encontrados por otros autores para *Picea abies* (L.) Kart. en los Alpes (Bartet, 1976) y *Pinus sylvestris* L. en la Sierra de Guadarrama (Rojo y Montero, 1996), y estudiando las medias de 20 claras medidas en Galicia para *Pinus radiata* D. Don, se ha llegado a una hipótesis plausible de la evolución de este coeficiente en cada una de las tres clases de parcelas consideradas (Tabla 9).

Tabla 9. Relaciones de volúmenes medios unitarios de la masa extraída y antes de clara de *Pinus radiata* D. Don según clases de densidad

Edad	Tipo A	Tipo B	Tipo C
10	0,35	0,40	0,45
15	0,45	0,50	0,60
20	0,47	0,55	0,65
25	0,47	0,60	0,70
30	0,47	0,60	0,70
35	0,47	0,60	0,70
40	0,47	0,60	0,70

Conocidos los volúmenes extraídos, es inmediata la obtención del volumen de la masa principal después de clara por diferencia entre éstos, $V_{7p}=V_7-V_{7e}$.

Es usual añadir una columna de volúmenes extraídos acumulados (V_{7ea}), que simplemente representa la suma de lo extraído hasta la edad considerada.

El diámetro medio cuadrático de la masa principal después de clara (d_{gp}) se calcula despejándolo de la ecuación fundamental de masa. El diámetro medio cuadrático de la masa extraída (d_{ge}) está relacionado funcionalmente con d_g , d_{gp} , N y N_p , mediante $d_{ge}^2=(N \cdot d_g^2 - N_p \cdot d_{gp}^2)/(N - N_p)$. Este proceder evita emplear la misma relación fundamental, $d_g=f(N, h_{dom}, S)$, para el cálculo del diámetro medio cuadrático antes y después de clara, lo que conduciría a estimaciones erróneas de los crecimientos (Decourt, 1974).

Las áreas basimétricas en m^2/ha de la masa principal (G), de la masa extraída (G_e) y de la masa después de clara (G_p) son inmediatas conociendo la relación funcional que liga el diámetro medio cuadrático y la densidad con el área basimétrica, $G=\pi \cdot N \cdot d_g^2/40.000$.

De forma análoga a como hicieran Hamilton y Christie (1971) en sus tablas de selvicultura media, ha parecido oportuno añadir columnas estimatorias de los volúmenes (en m^3/ha) hasta 14, 20 y 30 cm en punta delgada, tanto de la masa principal (V_{14} , V_{20} y V_{30}), como de la extraída (V_{14e} , V_{20e} y V_{30e}). Ello es posible con el curso de las relaciones adicionales que estiman los porcentajes respectivos de madera gruesa $P_x=V_x/V_7=f(d_g)$.

El volumen de la masa total o producción total (V_{7mt}) se calcula sumando el volumen de la masa principal después de clara (V_{7pt}) y el acumulado hasta ese momento t (V_{7eat}). El crecimiento medio de la masa total en $m^3/ha \cdot año$ (I_{vmt}) se halla dividiendo la producción por la edad (t), y el crecimiento corriente (I_{vmt5}), también en $m^3/ha \cdot año$, dividiendo por cinco años la dife-

rencia entre V_{7mt} y V_{7mt-5} . El crecimiento medio de la masa principal, antes o después de clara I_{vt} o I_{vpts} se calcula de forma análoga a lo reseñado para la masa total.

Ecuaciones ensayadas

Diferentes modelos lineales, polinómicos y logarítmicos (alométricos) (Martínez Millán *et al.*, 1993) se han empleado para calcular tarifas de cubicación de dos y tres entradas de volúmenes expresados en dm^3 , tanto de madera comercial, hasta 7 cm (v_7), como de madera gruesa, hasta 14, 20 y 30 cm en punta delgada (v_{14} , v_{20} y v_{30}). Las variables independientes introducidas en estos modelos han sido: el diámetro normal (d), y el diámetro a 4 m (d_4), ambos en cm, los cuadrados de ambos (d^2 y d_4^2), la altura total en m (h), los productos de los cuadrados de los diámetros anteriores por la altura total y el cuadrado de éstos últimos [$d^2 \cdot h$, $d_4^2 \cdot h$, $(d^2 \cdot h)^2$ y $(d_4^2 \cdot h)^2$].

Para estimar los volúmenes maderables de cada parcela hasta 7, 14, 20 y 30 cm en punta delgada, se ensayaron modelos polinómicos de segundo grado, con y sin término independiente, con el diámetro normal (d) y su cuadrado (d^2) como variables regresoras.

Para la elaboración de las curvas de calidad de estimación se siguieron distintas metodologías. Mediante el cálculo previo de una curva guía se obtuvieron los modelos anamórfico y polimórfico de Bailey y Clutter (1975), así como uno polimórfico basado en la función asintótica de Hossfeld, muy usada por su fácil linealización (*e.g.* Madrigal y Toval, 1975; Espinel *et al.*, 1997). Por regresión no lineal con todo el conjunto de los datos se ensayaron diez modelos parametrizados con el índice de sitio, dos de ellos anamórficos (Sánchez Rodríguez, 2001).

Se probaron tres modelos para estimar la altura media de la masa en función de la altura dominante y otras variables opcionales:

$$\bar{h} = b_0 + b_1 \cdot h_{dom} \quad (1.1)$$

$$\bar{h} = b_0 + b_1 \cdot h_{dom} + b_2 \cdot N^{-b_3} \quad (1.2)$$

$$\bar{h} = b_0 + b_1 \cdot h_{dom} + b_2 \cdot (h_{dom}/t)^{0.5} \cdot N^{-b_3} \quad (1.3)$$

Para describir la evolución de la densidad de cada uno de los tres grupos de parcelas establecidos se probaron distintos modelos con la densidad y el espaciamiento medio o sus logaritmos como variables regresoras:

$$N = b_0 + b_1 \cdot S + b_2 \cdot h_{dom} \quad (2.1)$$

$$N = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(t) \quad (2.2)$$

$$\text{Ln}(N) = b_0 + b_1 \cdot t \quad (2.3)$$

$$\text{Ln}(N) = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(h_{dom}) + b_2 \cdot \text{Ln}(S) \quad (2.4)$$

$$100 \cdot N^{-0.5} = b_0 + b_1 \cdot t^{b_2} \cdot h_{dom} \quad (2.5)$$

(Rojo y Montero, 1996)

$$100 \cdot N^{-0.5} = b_0 + b_1 \cdot h_{dom}^{b_2} \quad (2.6)$$

(Madrigal *et al.*, 1992)

$$100 \cdot N^{-0.5} = b_0 + b_1 \cdot S^{0.5} \cdot h_{dom} + b_2 \cdot h_{dom} \quad (2.7)$$

(Pita y Madrigal, 1973)

$$\text{Ln}(N^{0.5}/h_{dom}) = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(t^{0.5} \cdot \bar{h}^2) \quad (2.8)$$

(García Abejón, 1981)

La estimación del diámetro medio cuadrático (d_g) para cada grupo de parcelas requirió un estudio previo del modelo que previsiblemente proporcionaría el mejor resultado. Para ello se ensayaron las siguientes ecuaciones:

$$d_g = b_0 + b_1 \cdot N^{-k} + b_2 \cdot h_{dom} \quad (3.1)$$

(Madrigal y Toval, 1975)

$$d_g = b_0 + b_1 \cdot N^{-k} + b_2 \cdot h_{dom} + b_3 \cdot t \quad (3.2)$$

$$d_g = b_1 \cdot N^{-k} + b_2 \cdot h_{dom} + b_3 \cdot t \quad (3.3)$$

$$\text{Ln}(d_g) = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(N) + b_2 \cdot \text{Ln}(h_{dom}) \quad (3.4)$$

$$\text{Ln}(d_g) = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(N) + b_2 \cdot \text{Ln}(h_{dom}) + b_3 \cdot \text{Ln}(t) \quad (3.5)$$

$$\text{Ln}(d_g) = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(N) + b_2 \cdot \text{Ln}(S) + b_3 \cdot \text{Ln}(t) \quad (3.6)$$

$$\text{Ln}(d_g) = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(N) + b_2 \cdot \text{Ln}(h_{dom}) + b_3 \cdot \text{Ln}(S) \quad (3.7)$$

Para estimar el volumen maderable (V_7) se consideró necesario probar los siguientes ajustes:

$$V_7 = b_0 + b_1 \cdot G \cdot h_{dom} \quad (4.1)$$

$$V_7 = b_0 + b_1 \cdot G \cdot \bar{h} \quad (4.2)$$

$$V_7 = b_0 + b_1 \cdot G \cdot h_{dom} + b_2 \cdot d_g^2 \quad (4.3)$$

$$V_7 = b_0 + b_1 \cdot G \cdot \bar{h} + b_2 \cdot d_g^2 \quad (4.4)$$

$$\text{Ln}(V_7/G \cdot h_{dom}) = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(h_{dom}) + b_2 \cdot \text{Ln}(d_g) \quad (4.5)$$

$$\text{Ln}(V_7/G \cdot h_{dom}) = b_0 + b_1 \cdot \text{Ln}(\bar{h}) + b_2 \cdot \text{Ln}(d_g) \quad (4.6)$$

Finalmente, una relación adicional como la propuesta por Alder (1980) fue empleada para estimar los

porcentajes de madera gruesa a 14, 20 y 30 cm en punta delgada ($P_x = 100 \cdot V_x / V_7$, con x tomando los valores indicados) en función del diámetro medio cuadrático.

$$\ln(100 - P_x) = \ln(b_1) - b_2 \cdot d_g \quad (5.1)$$

Métodos estadísticos

Los métodos estadísticos empleados han sido:

— Regresión lineal para estimar los parámetros de las tarifas de cubicación de árboles en pie y de parcelas de inventario, así como de casi todas las ecuaciones fundamentales de las tablas de producción.

— Análisis de componentes principales para clasificar las parcelas de inventario.

— Regresión no lineal para estimar los parámetros de los modelos de crecimiento en altura de los árboles dominantes y de las ecuaciones completas, una vez parametrizadas con el índice de sitio.

Todos los cálculos han sido ejecutados con los programas de cálculo estadísticos SAS/STAT (1994). La bondad de los ajustes ha sido verificada mediante análisis gráficos de residuos tradicionales y el cálculo de los estadísticos más usuales. Para comprobar el modelo se ha efectuado una validación cruzada de todas las ecuaciones ensayadas, calculando el error medio cuadrático, la media, los valores máximos y mínimos, y los percentiles del 5 y 95% sobre los residuos tradicionales resultantes (Draper y Smith, 1981).

Resultados y Discusión

Tarifas de cubicación

Un análisis detallado de los errores medios y medios cuadráticos por intervalos de volumen con corteza reveló que las ecuaciones alométricas proporcionaron mejores resultados para volúmenes inferiores a 2.100 y 900 dm³ en las tarifas de dos y tres entradas respectivamente. No sucedió lo mismo con las tarifas para volúmenes de madera gruesa, ya que presentaron mejores resulta-

dos las ecuaciones de variable combinada. Las ecuaciones usadas para construir las tablas de producción y los resultados del proceso de validación fueron:

$$v_7 = 0,07632 \cdot d^{1,95868} \cdot h^{0,78780} \quad (R1)$$

$$v_{14} = -66,50767 + 0,23635 \cdot d^2 + 0,024254 \cdot d^2 \cdot h \quad (R2)$$

$$v_{20} = -198,32451 + 0,31334 \cdot d^2 + 0,022367 \cdot d^2 \cdot h \quad (R3)$$

$$v_{30} = -710,98343 + 0,63754 \cdot d^2 + 0,01335 \cdot d^2 \cdot h \quad (R4)$$

Relaciones fundamentales

Primera relación fundamental: curvas de calidad de estación

En el estudio de construcción de curvas de calidad de estación se comprobó una considerable reducción del error medio cuadrático al pasar de los métodos de la curva guía al ajuste de modelos parametrizados con el índice de sitio (Tabla 11). Además, se comprobó una mejor disposición de los residuos para estos últimos, así como unos resultados ligeramente mejores en los modelos polimórficos frente a los anamórficos.

Un análisis detallado de diversas ecuaciones de crecimiento ha permitido concluir que un buen ajuste lo proporciona una expresión derivada de la ecuación de Weibull (Sánchez Rodríguez, 2001). Este modelo ha sido empleado anteriormente para describir el crecimiento en especies canadienses ofreciendo buenos resultados (Payandeh y Wang, 1994). Siendo K un parámetro que se obtiene igualando la altura dominante (h_{dom}) al índice de sitio (S) a la edad de referencia ($t=20$ años), puede describirse la primera relación fundamental como:

$$h_{dom} = K \left(1 - \exp(-0,01127 \cdot t^{0,61029} S^{0,30184}) \right) \quad (R5)$$

La validación cruzada de la ecuación anterior ha conducido a los resultados siguientes (Tabla 12):

Dada la amplitud existente en el índice de sitio y los valores de los percentiles de los residuos obtenidos de la

Tabla 10. Error medio cuadrático, residuo medio, mínimo, máximo y percentiles del 5 y 95% de la validación cruzada de las tarifas de árbol individual

Ecuación	EMC	Med.	Mín.	P _{0,05}	Máx.	P _{0,95}
R1	118,64	1,10	-644,16	-131,28	506,41	173,73
R2	127,26	0,41	-658,31	-148,35	512,45	204,30
R3	141,19	0,30	-658,05	-164,16	559,08	219,57
R4	223,68	0,86	-684,66	-391,77	731,06	336,78

Tabla 11. Reducción del EMC observado según la metodología empleada en la construcción de las curvas de calidad de estación

Modelo/metodología	EMC
Hossfeld/curva guía	1,87
Bailey y Clutter anamórfico/curva guía	1,54
Bailey y Clutter polimórfico/curva guía	1,64
Anamórficos/ajustes parametrizados*	1,45
Polimórficos/ajustes parametrizados*	1,36

* Valor medio.

validación cruzada, se ha considerado idónea la separación de las curvas de calidad en 4 m. Ello ha conducido a definir cuatro calidades, 13, 17, 21 y 25 m por su altura dominante a los 20 años de edad de referencia (Fig. 1).

La gran amplitud constatada en el índice de sitio de las parcelas es reflejo de la variabilidad de condiciones de estación sobre las que se ha plantado esta especie en Galicia. La calidad media es muy inferior a la de los países que cuentan con gran superficie repoblada de *Pinus radiata* D. Don (Chile, Nueva Zelanda, etc.), en los que el índice de sitio a menudo supera los 30 m (Raupach, 1967; Gerding y Schlatter, 1995; García, 1999, etc.), muy probablemente debido a mayor regularidad en las precipitaciones y a mejores condiciones edáficas.

Comparadas con las masas vascas de la especie el índice de sitio medio puede ser algo inferior al que se deduce de los trabajos disponibles (Madrigal y Toval, 1975; Espinel *et al.*, 1997), sobre todo por la dificultad existente en Galicia de encontrar masas de calidad mayor a 22.

Segunda relación fundamental: altura media

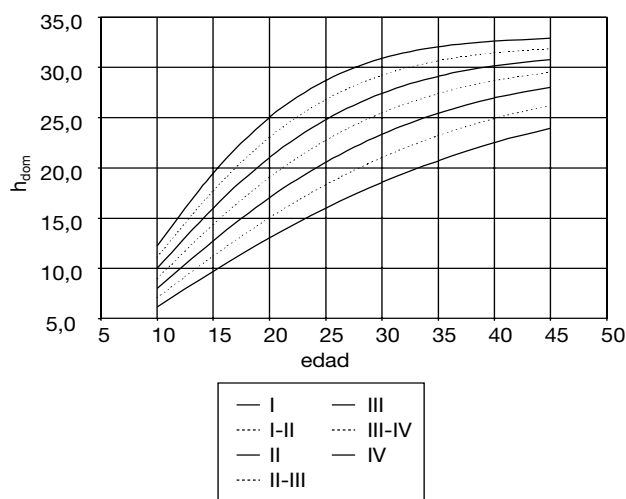
La introducción de la densidad como segunda variable regresora mejoró ligeramente los valores de los

Tabla 12. Error medio cuadrático, residuo medio, mínimo, máximo y percentiles del 5 y 95% de la validación cruzada del modelo para estimar la altura dominante

Ecuación	EMC	Med.	Mín.	P _{0,05}	Máx.	P _{0,95}
R5	1,37	-0,02	-4,93	-2,24	6,04	2,14

Tabla 13. Error medio cuadrático, residuo medio, mínimo, máximo y percentiles del 5 y 95% de la validación cruzada de tres modelos probados para estimar la altura media

Ecuación	EMC	Med.	Mín.	P _{0,05}	Máx.	P _{0,95}
1.1	1,18	0,00	-4,57	-1,96	3,18	1,76
1.2. (R6)	0,97	0,00	-3,39	-1,57	2,69	1,47
1.3	0,97	0,00	-3,43	-1,60	2,99	1,50

**Figura 1.** Curvas de calidad de estación de *Pinus radiata* D. Don en Galicia.

estadísticos que miden la bondad del ajuste (Tabla 13). Una densidad alta puede producir un efecto depresivo sobre la altura media, o simplemente conducir a una mayor proporción de pies dominados lo que tiene su lógica consecuencia en el valor de \bar{h} . La ecuación 1.3 no mejoró sensiblemente los resultados de los ajustes.

La ecuación final resulta:

$$\bar{h} = -1,79677 + 0,84463 \cdot h_{dom} + 173,96973 \cdot N^{-0,68} \quad (R6)$$

Tercera relación fundamental: densidad

Se comprobó una fuerte dependencia de la densidad con la edad, tanto para todo el conjunto de los datos como en las tres clases de parcelas establecidas. La inspección de los residuos y la necesidad de conseguir evoluciones coherentes de la densidad para distintos valores del índice de sitio limitaron la decisión final a los mo-

Tabla 14. Error medio cuadrático, residuo medio, mínimo, máximo y percentiles del 5 y 95% de la validación cruzada de tres de los modelos probados para estimar la evolución de la densidad de las parcelas según su tipo evolutivo

Tipo	Ecuación	EMC	Med.	Mín.	P _{0,05}	Máx.	P _{0,95}
A	2.2	226	00	-307	-289	516	490
	2.3 (R7A)	238	13	-336	-311	546	517
	2.5	268	60	-421	-381	704	577
B	2.2	135	00	-284	-233	346	211
	2.3 (R7B)	137	05	-346	-269	291	207
	2.5	165	31	-301	-212	554	288
C	2.2	136	00	-274	-252	309	204
	2.3	133	10	-262	-235	318	225
	2.5 (R7C)	151	24	-262	-213	435	254

delos 2.2, 2.3 y 2.5, que proporcionaron resultados muy parecidos en el proceso de validación (Tabla 14).

Finalmente, con una inspección detallada de los residuos se consideraron adecuadas las siguientes expresiones:

$$\ln(N) = 8,69851 - 0,06581 \cdot t \quad (\text{R7A})$$

$$\ln(N) = 8,32249 - 0,06861 \cdot t \quad (\text{R7B})$$

$$100 / N^{0.5} = 2,63479 + 0,00069 \cdot t^{1.50} \cdot h_{dom} \quad (\text{R7C})$$

Cuarta relación fundamental: diámetro medio cuadrático

La introducción de una tercera variable independiente en los modelos que predicen el diámetro medio

cuadrático supuso una considerable reducción del error medio cuadrático (Tabla 15).

Un análisis del error por tramos de d_g condujo a la elección del modelo 3.7, con los valores de los estadísticos del proceso de validación que se indican en la Tabla 16:

$$\ln(d_g) = 4,69893 - 0,39162 \cdot \ln(N) + 0,60493 \cdot \ln(h_{dom}) - 0,25334 \cdot \ln(S) \quad (\text{R8A})$$

$$\ln(d_g) = 4,17020 - 0,33455 \cdot \ln(N) + 0,73364 \cdot \ln(h_{dom}) - 0,33685 \cdot \ln(S) \quad (\text{R8B})$$

$$\ln(d_g) = 3,81968 - 0,27102 \cdot \ln(N) + 0,78880 \cdot \ln(h_{dom}) - 0,42673 \cdot \ln(S) \quad (\text{R8C})$$

Tabla 15. Error medio cuadrático, residuo medio, mínimo, máximo y percentiles del 5 y 95% de la validación cruzada de siete modelos probados para estimar el diámetro medio cuadrático

Ecuación	EMC	Med.	Mín.	P _{0,05}	Máx.	P _{0,95}
3.1	2,62	-0,01	-9,82	-3,61	8,47	4,63
3.2	2,15	-0,01	-9,80	-2,86	6,75	3,50
3.3	2,14	0,03	-9,81	-2,94	6,59	3,43
3.4	2,67	0,12	-8,69	-3,62	8,21	5,11
3.5	2,12	0,09	-8,87	-2,69	6,55	4,54
3.6	2,27	0,07	-10,71	-3,12	6,56	4,16
3.7	2,07	0,11	-6,92	-2,56	7,39	4,44

Tabla 16. Error medio cuadrático, residuo medio, mínimo, máximo y percentiles del 5 y 95% de la validación cruzada del modelo elegido para estimar el diámetro medio cuadrático por tipo de parcelas

Ecuación	EMC	Med.	Mín.	P _{0,05}	Máx.	P _{0,95}
R8A	2,17	0,06	-6,47	-3,01	8,33	2,55
R8B	2,03	0,09	-3,72	-2,87	5,92	3,77
R8C	2,25	0,12	-4,13	-2,79	6,11	5,06

Tabla 17. Error medio cuadrático, residuo medio, mínimo, máximo y percentiles del 5 y 95% de la validación cruzada de siete modelos probados para estimar el volumen maderable (función de masa)

Ecuación	EMC	Med.	Mín.	P _{0,05}	Máx.	P _{0,95}
R9	9,05	-0,17	-33,37	-18,79	27,34	14,77

Quinta relación fundamental: función de masa

Fue necesario eliminar la heteroescasticidad de los residuos generados al ajustar las ecuaciones más comunes (4.1 a 4.4) adoptando expresiones logarítmicas. Finalmente el modelo elegido fue el 4.5, dado que la sustitución de h_{dom} por \bar{h} apenas supuso mejoría. El error medio cuadrático obtenido respecto a la variable V_7 es de 9,05, estando el 90% de los residuos entre -18,79 y 14,77 m³/ha (Tabla 17).

$$\begin{aligned} \ln(V_7/G \cdot h_{dom}) = & 0,26266 - 0,27196 \cdot \\ & \cdot \ln(h_{dom}) + 0,06894 \cdot \ln(d_g) \end{aligned} \quad (R9)$$

Relaciones adicionales

Las expresiones correspondientes al modelo de Alder (1980) indican que el error aumenta conforme lo hace el diámetro en punta delgada (del 3 al 7%). El intervalo que muestran los percentiles (del $\pm 5\%$ al $\pm 10\%$ respectivamente), son admisibles para los objetivos a cubrir con estas ecuaciones (Tabla 18):

$$\begin{aligned} 100 \cdot (V_{14}/V_7) = & 100 - 338,38389 \cdot \\ & \cdot \exp(-0,13770 \cdot d_g) \end{aligned} \quad (R10)$$

$$\begin{aligned} 100 \cdot (V_{20}/V_7) = & 100 - 314,21391 \cdot \\ & \cdot \exp(-0,09051 \cdot d_g) \end{aligned} \quad (R11)$$

$$\begin{aligned} 100 \cdot (V_{30}/V_7) = & 100 - 257,37933 \cdot \\ & \cdot \exp(-0,05054 \cdot d_g) \end{aligned} \quad (R12)$$

Tabla 18. Error medio cuadrático, residuo medio, mínimo, máximo y percentiles del 5 y 95% de la validación cruzada del modelo elegido para estimar los porcentajes de madera hasta 14, 20 y 30 cm

Ecuación	EMC	Med.	Mín.	P _{0,05}	Máx.	P _{0,95}
R10	3,08	0,22	-14,59	-5,25	10,84	4,62
R11	5,05	0,22	-16,14	-9,62	17,53	8,47
R12	6,93	0,07	-15,09	-9,70	20,13	11,43

Tablas de producción

Con las relaciones descritas en el apartado anterior se han construido 12 tablas de producción (Tabla 19), una para cada tipo de parcelas y cada calidad de estación (A, B y C, de mayor a menor densidad, y valores de S iguales a 13, 17, 21 y 25 m).

Turnos y crecimientos

A partir de dichas tablas es posible elaborar un cuadro resumen de turnos de máxima renta en especie y crecimientos (Tabla 20), del que pueden extraerse las siguientes conclusiones:

— Los valores del turno de máxima renta en especie oscilan entre 28 y más de 44 años.

— Los turnos aumentan según disminuye la calidad de estación. La variación del índice de sitio a intervalos de 4 m produce aumentos de cuatro a siete años desde un índice de 25 hasta uno de 13 m.

— Las clases de calidad más comunes, 17 y 21 m, presentan turnos de máxima renta en especie entre 40 y 32 años.

— Se cumple el postulado de Assmann referente a las disminuciones de los turnos conforme se intensifican las claras. La caída del turno es muy somera, a lo sumo de un año, para las parcelas de mayor densidad, pero mayor, de uno a tres años, si se comparan éstas con la clase de densidad baja.

— El índice de sitio tiene también una gran trascendencia en los valores de los crecimientos de la masa principal antes de clara, que aumentan entre 1-2 y 3-4 m³/ha·año al pasar de una clase de calidad a la siguiente, según se consideren parcelas poco densas o de las clases superiores respectivamente.

Tabla 20. Valores del turno de máxima renta en especie y de los crecimientos medios de la masa principal, antes y después de clara, y de la masa total, a los 30 años en $m^3/h \cdot \text{año}$ (I_{v30} , I_{vp30} y I_{vm30} respectivamente), para cada clase de calidad y densidad

	S = 13 Tipo			S = 17 Tipo			S = 21 Tipo			S = 25 Tipo		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Turno	—	—	44	40	39	37	33	33	32	29	29	28
I_{v30}	10,1	9,1	8,1	13,9	12,7	10,0	17,1	15,7	11,3	19,8	18,2	12,1
I_{vp30}	8,8	7,5	6,5	12,1	10,5	8,0	14,9	13,0	9,0	17,2	15,0	9,8
I_{vm30}	12,1	11,7	10,6	16,8	16,6	13,9	21,0	21,0	16,5	24,7	25,1	18,5

— El crecimiento medio de la masa total a los 30 años es casi idéntico en las dos clases de parcelas de mayor densidad, probablemente porque las parcelas de la clase de densidad elevada (A) se encuentran cercanas a la zona de autoaclareo, estando el vuelo en espesura completa.

— La disminución del crecimiento medio de la masa total, al pasar a la clase de inferior densidad, es de 6,6 a 1,1 $m^3/ha \cdot \text{año}$, según sea el índice de calidad, mayor cuanto más alto sea este índice. Para las calidades intermedias, 17 y 21, que son las más usuales, la caída de la producción se cifra en 2,7 y 4,5 $m^3/ha \cdot \text{año}$ respectivamente.

— El crecimiento medio de la masa principal disminuye en todos los casos, como era previsible, a medida que se intensifican las claras. Para las clases de mayor densidad, esta disminución se ve compensada con las cortas intermedias al igualarse la producción total.

Consideraciones y recomendaciones selvícolas

Puede calificarse la producción de las masas principales a los 30 años atendiendo a los respectivos valores de madera a distintos grosores en punta delgada que aparecen en las tablas de producción. Para realizar comparaciones entre las clases de parcelas se ha elaborado la Tabla 21, en la que se muestran los valores de los volúmenes de la masa principal a los 30 años, globalmente y por segmentos de diámetro, y los totales extraídos.

Pueden comprobarse los siguientes resultados:

— La opción de parcelas densas (A), no supone un aumento apreciable en volumen respecto a la intermedia y, como era de suponer, se produce un traslado considerable del volumen hacia piezas de pequeño diámetro, menores a 20 y de 20 a 30 cm, a costa de una considerable reducción del volumen de madera gruesa (mayor a 30 cm).

Tabla 21. Valores de la densidad (N), del diámetro medio cuadrático (dg), del volumen maderable de la masa principal antes de clara (V_7), de su fraccionamiento por clases de grosor (V_{7-14} , V_{14-20} , V_{20-30} y V_{+30}), del volumen extraído (V_{7ea}) y del total (V_{7m}) a la edad de 30 años para cada clase de calidad y densidad

Índice de sitio	Clase de densidad	N	dg	V_7	V_{7-14}	V_{14-20}	V_{20-30}	V_{+30}	V_{7ea}	V_{7m}
S = 13	A	832	24,1	303,8	37,3	70,6	123,5	72,3	60,7	364,5
	B	525	28,6	272,9	18,1	46,6	101,2	107,0	78,9	351,8
	C	452	29,2	242,9	14,8	39,6	88,6	99,8	75,7	318,6
S = 17	A	832	25,9	416,6	40,0	86,0	164,1	126,5	88,2	504,9
	B	525	30,9	379,9	18,3	54,6	132,3	174,7	117,7	497,6
	C	365	33,1	300,2	10,7	36,5	97,8	155,2	115,6	415,7
S = 21	A	832	27,0	513,1	42,0	97,7	197,2	176,2	117,6	630,7
	B	525	32,4	470,9	18,4	60,5	156,9	235,0	160,5	631,4
	C	303	35,9	338,5	8,1	33,0	100,5	196,8	155,1	493,6
S = 25	A	832	27,8	593,1	43,7	106,9	224,0	218,5	148,8	741,9
	B	525	33,3	545,2	18,7	65,2	176,4	284,8	207,1	752,3
	C	256	38,0	362,8	6,6	30,0	100,2	226,0	193,6	556,5

— La disminución del crecimiento y la producción al pasar al tipo menos denso (C), tiene una lógica contrapartida en el correspondiente aumento del diámetro medio cuadrático de la masa principal, que se estima en 0,6; 2,1; 3,5 y 4,7 cm entre las dos clases menos densas (B y C).

— El volumen de madera gruesa, mayor a 30 cm, es algo superior en la opción intermedia (de un 10 a un 20% para índices de sitio de 17 y 21 m), pero este volumen se acumula en menos árboles en el caso de baja densidad, lo que hace prever un mayor porcentaje de esa madera gruesa aprovechable para desenrollo.

Basándose en estos resultados puede afirmarse que la opción de parcelas más densas debe descartarse por antieconómica, siendo reflejo de la necesidad de divulgar la silvicultura de esta especie entre los gestores, así como de liberar los recursos necesarios que la hagan posible.

Cuestión distinta es dilucidar entre los grupos menos densos, por cuanto la caída de la producción es considerable, mayor cuanto más elevado es el índice de sitio. Hay ventajas en la opción menos densa (de evolución parecida a la elaborada por Madrigal y Toval, 1975), por un aumento del diámetro de la masa extraída en las claras, pero a tenor de los datos que se exponen, ese aumento no compensa la caída de la producción. Desde un punto de vista de la producción de madera, sería ésta una elección preferible en el caso de un mercado de madera demandante de diámetros muy gruesos para producir chapa ($d_g > 35$ cm), con precios que compensaran la pérdida de producción y demanda de trozas de gran longitud. El caso neozelandés es el paradigma de una silvicultura orientada a la producción de madera gruesa de calidad, que destina gran parte de su producción a la exportación al mercado asiático, con buenas perspectivas de tomar posiciones en el mercado europeo y norteamericano. Condición necesaria, aunque no suficiente, es una alta productividad, ya que se comprueba la dificultad de alcanzar los diámetros requeridos con índices de sitio inferiores a 21 m (Tabla 19).

Para montes comunales, un esquema progresivo dirigido a la producción de madera de sierra y desenrollo con extracción de madera de industria en las cortas intermedias parece la opción más recomendable, sobre todo si la productividad no es elevada y hay necesidad de controlar el sotobosque. La propuesta representada por las tablas de tipo B combina una alta producción con una dimensión final adecuada a los objetivos planteados (densidad de unos 373 pies/ha y d_g entre 36 y 38 cm a los 35 años).

Un claro (si la plantación se realiza a 2.000 pies/ha) y tres claras con rotación de siete años (14, 21 y 28) pueden ser necesarias para guiar la masa al final del turno. Cada una de las claras, de moderadas a fuertes, extraería el 38% de los pies, siendo el índice de Hart-Becking antes de clara, alrededor de un 15 y un 18% para las calidades 21 y 17 respectivamente (Tabla 22). El coeficiente de estabilidad de la masa principal antes de clara (d_g/\bar{h}) no traspasa el límite de 1,18 que pone en peligro la estabilidad de las masas de esta especie con rotaciones de clara de siete años (Gadow y Bredenkamp, 1992).

Otras consideraciones ambientales, como el aumento de la biodiversidad, la reducción de la extracción de nutrientes, etc., pueden inclinar las preferencias del gestor hacia la opción de menor densidad, donde el índice de Hart-Becking antes de clara se sitúa alrededor del 20%.

Agradecimientos

El proyecto de investigación XUGA 29105B-96 titulado «Estudio de crecimiento y producción de pinares regulares de *Pinus radiata* D. Don en Galicia» desarrollado conjuntamente por los Departamentos de Producción Forestal e Ingeniería Agroforestal de la E.P.S. del Campus Lucense de la USC en el bienio 1996-98 ha servido para financiar parcialmente este trabajo. En muchos casos la instalación de parcelas y la toma de datos ha sido posible gracias a la colaboración de miembros del cuerpo de agentes forestales de la Xunta de Galicia. Especial recuerdo a aquéllos que ya no están con nosotros pero que lo hicieron posible.

Referencias bibliográficas

- ALDER D., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Estudios F.A.O., Montes 22/2, Roma, 189 pp.
- ASSMANN E., 1970. The principles of forest yield study. Pergamon Press, Oxford, New York, 506 pp.
- BAILEY R.L., CLUTTER J.L., 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. Forest Sci 20 (2), 155-159.
- BARTET J.H., 1976. Construction de tables de production à sylviculture variable pour l'épicea dans les Alpes du Nord. Office Nationale des Forêts, Document 76-9, 90 pp.
- CANTERO A., ESPINEL S., SÁENZ D., 1995. Un modelo de gestión para las masas de *Pinus radiata* en el país Vasco. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 1, 193-198.

- CARMEAN W.H., 1972. Site index curves for upland oaks in the Central States. *Forest Sci* 18, 109-120.
- CARMEAN W.H., LENTHALL D.J., 1989. Height-growth and site-index curves for jack pine in north central Ontario. *Can J Forest Res* 19, 214-224.
- CASTILLA G., PRIETO A., 1992. Desarrollo y utilización de un simulador de producción de madera para masas de *Pinus radiata* D. Don en el País Vasco. *Invest Agrar.: Sist Recur For* 1 (2), 189-210.
- DECOURT N., 1965. Le Pin sylvestre et le Pin laricio de Corse en Sologne. *Annales des Sciences Forestières* 12 (2), 259-318.
- DECOURT N., 1974. Remarque sur une relation dendrométrique inattendue. Consequences methologiques pour la construction des tables de production. *Annales des Sciences Forestiers* 31 (1), 47-55.
- D.G.C.N., 2000. Tercer Inventario Forestal Nacional, 1997-2006: Galicia. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.
- DRAPER N.R., SMITH H., 1981. Applied regression analysis. Wiley, New York, 709 pp.
- DYER M.E., BAILEY R.L., 1987. A test of six methods for estimating true heights from stem analysis data. *Forest Sci* 33 (1), 3-13.
- ECHEVERRÍA I., 1942. Ensayo de tablas de producción del *Pinus insignis* en el norte de España. I.F.I.E., Madrid, 67 pp.
- ECHEVERRÍA I., DE PEDRO S., 1956. «*Pinus insignis*», crecimiento y producción en el norte de España, y aplicación a la elaboración de la pasta de celulosa. I.F.I.E. Madrid.
- ESPINEL S., CANTERO A., SÁENZ D., 1997. Un modelo de simulación para rodales de *Pinus radiata* en el País Vasco. *Montes* 48, 34-38.
- GADOW von K., BREDENKAMP B., 1992. Forest management. Academica, Pretoria, Sudáfrica, 151 pp.
- GADOW von K., ROJO A., ÁLVAREZ, J. G., RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R., 1999. Ensayos de crecimiento. Parcelas permanentes, temporales y de inventario. *Invest Agrar.: Sist Recur For*, Fuera de Serie 1, 299-310.
- GARCÍA O., 1999. Height growth of radiata pine in New Zealand. *New Zeal J Forest Sci* 29 (1), 131-145.
- GARCÍA ABEJÓN J.L., 1981. Tablas de producción de densidad variable para *Pinus sylvestris* L. en el Sistema Ibérico. *Comunicaciones del I.N.I.A.*, Serie Recursos Naturales 10, 47 pp.
- GERDING V., SCHLATTER J.E., 1995. Variables del sitio de importancia para la productividad del *Pinus radiata* D. Don en Chile. Simposio I.U.F.R.O. para Cono Sur Suramericano sobre Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales, Valdivia, Chile, pp. 159-180.
- HAMILTON G.J., CHRISTIE J.M., 1971. Forest management tables (metric). *Forestry Commission Booklet* 34, 201 pp.
- MACLAREN J.P., 1993. Radiata pine grower's manual. F.R.I. Bulletin nº 184. New Zealand Forest Research Institute, Nueva Zelanda, 140 pp.
- MADRIGAL A., 1991. Tablas de producción. Seminario sobre inventario y ordenación de montes, Valsain, Segovia, Vol. II, 32-70.
- MADRIGAL A., 1992. Ecología, selvicultura y producción del *Pinus radiata* D. Don en España, con especial referencia al País Vasco. En: Curso Internacional Erasmus sobre Desarrollo de Especies de Crecimiento Rápido e Impacto sobre el Medio Ambiente. Valsain, Segovia, 20 pp.
- MADRIGAL A., TOVAL G., 1975. Tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en el País Vasco. Dirección General de la Producción Agraria, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- MADRIGAL A., PUERTAS F., MARTÍNEZ MILLÁN F.J., 1992. Tablas de producción para *Fagus sylvatica* L. en Navarra. Serie Agraria nº3. Departamento de Agricultura, Ganadería y Montes, Gobierno de Navarra, Pamplona, 122 pp.
- MADRIGAL A., ÁLVAREZ J.G., RODRÍGUEZ R., ROJO A., 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fundación del Conde del Valle de Salazar, Madrid, 253 pp.
- ORTEGA A., MONTERO G., 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. *Ecología* 2,155-184.
- MARTÍNEZ MILLÁN J., ARA P., GONZÁLEZ DONCEL I., 1993. Ecuaciones alométricas de tres variables: estimaciones del volumen, crecimiento y porcentaje de corteza de las principales especies maderables españolas. *Invest Agrar.: Sist Recur For* 2 (2), 211-228.
- PAYANDEH B., WANG Y., 1994. Modified site index equations for major Canadian timber especies. *Forest Ecol Manag* 64, 97-101.
- PITA CARPENTER P.A., MADRIGAL A., 1973. Modelos matemáticos ensayados en la preparación de tablas de producción de *Pinus sylvestris*. *Montes* 174, 425-435.
- RAUPACH M., 1967. Soil and fertiliser requirements for forests of *Pinus radiata*. *Adv Agron* 19, 307-353.
- RODRÍGUEZ SOALLEIRO R., 1995. Crecimiento y producción de masas regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Alternativas selvícolas posibles. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, 297 pp.
- ROJO ALBORECA A., MONTERO G., 1996. El pino silvestre en la Sierra de Guadarrama. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 293 pp.
- SÁNCHEZ RODRÍGUEZ F., 2001. Estudio de la calidad de estación, crecimiento, producción y selvicultura de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis doctoral, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, 356 pp.
- SAS/STAT., 1994. User's guide. Version 6. Fourth Edition. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- XUNTA DE GALICIA, 2001. O monte en Galicia en cifras. Dirección Xeral de Montes e Medio Ambiente Natural, Xunta de Galicia, 226 pp.