

## Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia

A. Merino\*, C. Rey, J. Brañas y R. Rodríguez-Soalleiro

Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. E-27002 Lugo. España

### Resumen

En este trabajo se presentan datos sobre biomasa arbórea y contenidos de nutrientes en nueve plantaciones de *Pinus radiata* localizadas en Galicia sobre los suelos más representativos en la zona, desarrollados sobre esquistos y rocas graníticas. A partir de los datos dasométricos de 54 árboles, se desarrollaron modelos para estimar las diferentes fracciones arbóreas. Los restos de corta (ramas, acículas y piñas) acumulan la mayor proporción del N de la plantación (60%), así como cantidades substanciales de P, K, Ca y Mg (entre 36 y 47%). Las acumulaciones en la biomasa arbórea de P, Mg, K y en algunos casos Ca, son considerablemente superiores a las cantidades asimilables en los suelos. Estos datos, por una parte, confirman que las frecuentes deficiencias de esos elementos en estas plantaciones se deben a su escasa reserva en los suelos. Por otro lado, también sugieren que la estabilidad nutricional de estos sistemas depende de los aportes de elementos durante la descomposición de los restos de corta. Los resultados muestran la necesidad de realizar fertilizaciones que compensen la extracción de nutrientes durante el aprovechamiento, especialmente si éste incluye la retirada de restos de corta.

**Palabras clave:** *Pinus radiata*, biomasa arbórea, carbono, nutrición forestal, restos de corta.

### Abstract

#### Above ground tree biomass and accumulation of nutrients in *Pinus radiata* plantations from northern Spain

In this work the amount of nutrients accumulated in the above ground biomass of nine representative *Pinus radiata* plantations from NW Spain were studied. From the data of 54 trees, models to estimate the mass of the different tree fractions were developed. The logging residues accumulate the most part of N (60%), as well as substantial amounts of P, K, Ca and Mg (36 to 47%). The accumulations in tree biomass of P, Mg, K and, in some cases, Ca are considerably higher than the available amounts in the soil. The data confirm that the frequent deficiencies of these elements in this type of forest plantations are due to the low nutrient storage in the soils. They also suggest that the nutritional stability of these systems is dependent on the nutrient supply by the decomposition of logging residues. These results, along with those of previous studies, show the need to carry out an appropriate management of logging residues, as well as fertilisation programmes to compensate the nutrient extractions by the clear cutting, especially if whole-tree harvesting is carried out.

**Key words:** *Pinus radiata*, tree biomass, carbon, forest nutrition, logging residues.

### Introducción

Diferentes intereses industriales, energéticos y ambientales hacen que en los últimos años el estudio sobre la biomasa forestal esté adquiriendo una creciente atención. En las áreas con amplios recursos forestales, entre las que se encuentra el norte de España, se está considerando la posibilidad del aprovechamiento de la biomasa arbórea no maderable como fuente de energía y materia prima para la industria de

la transformación de la madera, lo que ha motivado el desarrollo de diferentes ecuaciones de estimación de la biomasa arbórea en diferentes especies y estructuras de masa (Waring y Running, 1998; Cunia, 1988).

Por otro lado, dada la contribución de las áreas arboladas al ciclo global del carbono, existe la necesidad de determinar la reserva de este elemento en los sistemas forestales (I.P.C.C., 2000). La información sobre la cantidad de biomasa arbórea también constituye una valiosa herramienta para la gestión selvícola, por su relación con la propagación de plagas, incendios y conservación de suelos. Adicionalmente, los datos sobre distribución de nutrientes en el árbol son útiles para

\* Autor para la correspondencia: amerino@lugo.usc.es  
Recibido: 23-05-02; Aceptado: 17-03-03

realizar un manejo sostenible de masas, porque permiten evaluar las cantidades de nutrientes extraídas por los diferentes tipos de aprovechamiento (Freedman *et al.*, 1981; Augusto *et al.*, 2000; Montero *et al.*, 1999) y, de esta manera, estimar la reposición necesaria de nutrientes, aspecto contemplado en los programas de certificación de gestión forestal sostenible.

La fracción no maderable del árbol (corteza, ramas y hojas) acumula una parte importante de los nutrientes asimilados por éste a lo largo de la rotación. Por este motivo, en algunos sistemas donde la fertilidad edáfica es baja, la disponibilidad de nutrientes parece estar muy determinada por los aportes durante la descomposición de los restos orgánicos que se generan durante el desfronde y el aprovechamiento forestal (Hopmans *et al.*, 1993; Cortina y Vallejo, 1994). Por este motivo, las preparaciones intensivas que incluyen la retirada de los restos de corta pueden degradar la fertilidad física y química de los suelos, lo que repercute en el estado nutricional y crecimiento de los árboles (Tuttle *et al.*, 1985; Schlatter *et al.*, 1998; Merino y Edeso, 1999).

Todos estos aspectos adquieren una especial importancia en Galicia, dado el particular desarrollo de la industria maderera de trituración y de pasta de papel, que demanda crecientemente biomasa forestal no maderable (Bermúdez Alvite y Piñeiro Veiras, 2000). La posibilidad de su aprovechamiento requiere información no sólo de las cantidades de biomasa disponibles, sino también de valoraciones sobre las posibles repercusiones ambientales de esta práctica. En un trabajo anterior (Brañas *et al.*, 2000) se determinaron las cantidades de biomasa arbórea y la distribución en nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus globulus* del noroeste peninsular. Los resultados revelaron que los residuos de corta contienen más de la mitad de los nutrientes acumulados por la masa arbórea. También pusieron de manifiesto que los suelos de esta zona presentaban una baja reserva de elementos limitantes para la producción de esta especie. Siguiendo esta línea, el presente trabajo aborda el estudio de pino insigne, otra especie frecuentemente empleada en plantaciones comerciales intensivas del norte peninsular.

La superficie forestal donde está presente *Pinus radiata* en la Comunidad Autónoma de Galicia es de aproximadamente 90.000 ha (Xunta Galicia, 2001), lo que sitúa a esta especie entre las tres más empleadas, por detrás de *Pinus pinaster* y *Eucalyptus globulus*. En la zona climática más favorable para esta especie en la región, la producción varía de manera importante en-

tre las diferentes plantaciones, lo que se relaciona con el estado nutricional de las masas y las propiedades de los suelos (Sánchez Rodríguez *et al.*, 2002). En este sentido, la mayor parte de las plantaciones presentan deficiencias importantes de P y Mg, y muchas de ellas, de Ca, lo que se atribuye a la acidez y al bajo nivel de nutrientes de los suelos (Sánchez Rodríguez *et al.*, 2002; Zás y Serrada, 2003).

Uno de los objetivos del presente trabajo es desarrollar modelos para estimar, a partir de datos dasonométricos, las cantidades de biomasa maderable y no maderable acumuladas en plantaciones de *Pinus radiata*. En el estudio también se cuantifican los contenidos y distribución de nutrientes en las diferentes fracciones de la biomasa arbórea. Los datos de este trabajo proporcionan información para planificar el posible aprovechamiento de la biomasa arbórea, considerando las implicaciones sobre la conservación de los suelos y la nutrición forestal. De manera paralela a estos dos objetivos principales, el estudio proporciona datos sobre acumulación de C en biomasa y en suelos, los cuales pueden ser empleados en los inventarios sobre la acumulación de C en los sistemas forestales.

## Material y métodos

### Características generales del área de estudio

La Tabla 1 recoge información sobre las condiciones geográficas de las nueve plantaciones seleccionadas para este estudio. Las parcelas se encuentran en los términos municipales de Baralla, Guitiriz, Lánca, O Corgo, de la provincia de Lugo (Figura 1). La altitud de las parcelas oscila entre 500 y 700 m sobre el nivel de mar. La precipitación anual varía entre 1.000 y 1.700 mm, con una temperatura entre 10,7 y 11,7 °C (Carballeira *et al.*, 1983). El régimen de humedad del suelo es Údico con un período de sequía de 1 mes en verano. La inclinación del terreno es variable entre las parcelas establecidas y oscila entre 2 y 20°.

Los suelos de la zona se desarrollan sobre esquistos y rocas graníticas. Diferentes trabajos anteriores (Gutián Ojea *et al.*, 1982; Macías y Calvo, 1992) revelaron que los suelos forestales de la zona se caracterizan por profundidades entre 30 y 50 cm, que llega a ser inferior a 30 cm en los suelos sobre rocas graníticas localizadas en zonas de pendiente. La textura de los suelos sobre rocas graníticas es de tipo franco are-

**Tabla 1.** Localización y características fisiográficas y dasométricas de las 9 parcelas de *Pinus radiata* seleccionadas

Parcela	Término municipal	Altitud (m)	Pendiente (°)	Edad (años)	Dg (cm)	Ho (m)	Densidad (pies ha <sup>-1</sup> )	Índice de sitio
1	Baralla	550	0-5	25	24,7	27,1	1040	23,5
2	Baralla	610	5-10	16	14,5	17,0	1587	20,5
3	Baralla	690	8-10	20	16,4	22,4	1696	22,4
4	Baralla	570	15-20	18	20,2	21,5	1168	23,2
5	Corgo	500	0-2	25	21,2	25,4	1213	21,8
6	Guitiriz	700	5-10	18	18,0	16,9	1213	18,5
7	Guitiriz	585	10-15	29	34,6	28,1	411	22,2
8	Guitiriz	510	5-8	20	18,7	21,1	1173	21,1
9	Láncara	600	0-3	19	16,9	20,7	1536	21,5
Media		590,6		21,1	20,6	22,2	1226	21,6

Dg: diámetro cuadrático medio. Ho: altura dominante.

nosa, y suelen presentar una reserva de agua inferior a 150 mm. En los desarrollados sobre esquistos, con una textura más equilibrada, esta reserva suele ser superior a 200 mm. Otras propiedades comunes son los elevados contenidos de materia orgánica en el horizonte superficial, el fuerte carácter ácido y los bajos contenidos en nutrientes, como P, Ca, Mg y K.

Las rotaciones más frecuentes para estas plantaciones son entre 30 y 35 años. En ellas se practican podas y claras, durante las cuales la densidad inicial de 1.500-2.200 árboles se reduce hasta 300-600 pies. El aprovechamiento se realiza como corta a hecho.

**Figura 1.** Localización de las parcelas estudiadas.

### Características de las plantaciones seleccionadas

Para el trabajo se seleccionaron nueve plantaciones de un conjunto de 100, en las que se determinó el índice de sitio a 20 años de edad a partir de curvas de crecimiento (Sánchez Rodríguez, 2001). Las parcelas cuentan con una superficie mínima de 1 ha. Se eligieron de forma que presentaran diferentes calidades, edades y tipo de suelos. Las parcelas tienen edades comprendidas entre 16 y 29 años. Los parámetros dasométricos y los valores de índice de sitio, recogidos por Sánchez Rodríguez (2001), se muestran en la Tabla 1. En seis de las parcelas el material geológico de partida de los suelos es esquisto, mientras que en las tres restantes es roca granítica (Tabla 6). Según la clasificación FAO-Unesco (1998), los suelos se clasifican como Cambisoles dísticos (4 parcelas), Umbrisoles húmicos (3), Regosol dístico (1) y Regosol léptico (1).

### Determinación de la biomasa arbórea

La metodología seguida para determinar la biomasa arbórea en fracciones es similar a la empleada en un trabajo anterior para *Eucalyptus globulus* (Brañas *et al.*, 2000).

En cada una de las parcelas se seleccionaron y apearon seis árboles representativos de la calidad media de dicha parcela y con diámetro similar al diámetro medio cuadrático. Se rechazaron los individuos que presentaron efecto borde o dañados por enfermedades. Al final del proceso se obtuvieron datos de 54 árboles con diámetros comprendidos entre 10 y 40 cm.

En cada uno de estos árboles, la biomasa arbórea se fraccionó en madera (hasta 7 cm de diámetro con corteza), corteza (correspondiente al fuste), ramas gruesas (ramas con corteza de diámetro entre 2 y 7 cm), ramas finas (entre 0,5 y 2 cm de diámetro), ramillos (con diámetro inferior a 0,5 cm) y hojas. Cada una de estas fracciones se pesó en húmedo en el campo. De todas estas fracciones y de cada uno de los árboles se tomaron muestras representativas, que fueron trasladadas al laboratorio para el análisis de humedad y elementos químicos. Para la madera y la corteza se emplearon de 3 a 5 discos a diferentes alturas del tronco, que después servirían para estimar los porcentajes de madera y corteza para cada tramo del fuste. Los valores de peso en seco se calcularon a partir de los datos de humedad obtenidos en muestras representativas. Todo ello permitió tener valores de peso seco de las fracciones para cada árbol. En este trabajo se definen tanto los restos de corta como las fracciones que permanecen sobre el terreno después del aprovechamiento en la mayor parte de las plantaciones, que son las ramas gruesas y finas, los ramillos, las acículas y las piñas.

Los datos recogidos sirvieron para elaborar modelos alométricos que relacionan la biomasa de cada fracción con el diámetro normal (Dn) y/o la altura. Una vez seleccionadas las ecuaciones se procedió a calcular en cada parcela la biomasa contenida en una hectárea de terreno, para lo que se empleó el inventario dasométrico completo de las parcelas (López Sánchez, 2001).

Los análisis químicos de las diferentes fracciones de biomasa incluyeron los siguientes elementos: C, S, N, P, K, Ca y Mg. Con los datos de los análisis nutricionales y la cantidad en peso seco de la biomasa por unidad de superficie, se calcularon las cantidades de elementos contenidos, en  $\text{kg ha}^{-1}$ , en cada una de las fracciones.

## Estudio de los suelos

En cada parcela se recogieron tres muestras del horizonte orgánico del suelo (mantillo), seleccionadas al azar, en aros de 0,3 m de diámetro. Estas muestras se secaron en estufa a 65 °C hasta peso constante para efectuar los análisis de C, S, N, P, K, Ca y Mg. El peso medio y las concentraciones medias de las tres réplicas se utilizaron para calcular la masa del horizonte orgánico y su contenido en nutrientes por unidad de superficie. El coeficiente de variación del peso de las tres muestras obtenidas en las parcelas osciló entre 9

y 21% (la media de los coeficientes de variación fue de 18%).

En cada parcela las muestras del horizonte mineral superficial del suelo (horizonte A o A<sub>1</sub>, dependiendo del caso) se recogieron en 9 puntos seleccionados al azar, con lo que se confeccionaron 3 muestras múltiples. Para la toma de muestras de los horizontes subsuperficiales, se practicaron 3 calicatas. El mayor número de muestras del horizonte A se debió a la necesidad de estimar de manera precisa la pedregosidad, puesto que este dato determina las cantidades de elementos asimilables por unidad de superficie con las que se realizan las estimaciones sobre estabilidad nutricional del sistema forestal.

En las muestras de suelo mineral secadas al aire se determinó la pedregosidad, distinguiéndose tres fracciones: < 2 mm, 2-50 mm y > 50 mm. La densidad aparente de cada horizonte se determinó en cada calicata con la toma de una muestra con un cilindro de acero de 2,8 cm de radio interior y 4 cm de altura y secada hasta peso seco constante a 105 °C. En la fracción inferior a 2 mm se determinó pH, C, N y S totales, así como Ca, Mg, Na y K de cambio.

Las cantidades de nutrientes en el suelo por unidad de superficie se calcularon para cada horizonte a partir de los datos medios de espesor, pedregosidad, densidad aparente y concentración de nutrientes.

## Técnicas de análisis

Todas las muestras vegetales y el mantillo, después de secarse en estufa a 65 °C hasta peso constante, se molieron y se hicieron pasar por un tamiz de 0,25 mm. En estas muestras se determinó la concentración de C, S y N, por combustión, en un autoanalizador Leco. El resto de los elementos se determinaron tras realizar una digestión previa con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a una temperatura de 390 °C. En este digerido se determinaron las concentraciones de P, mediante colorimetría con ácido ascórbico y molibdeno (Guitián y Carballas, 1976), mientras que las de K, Ca y Mg, se determinaron mediante un espectrofotómetro de absorción-emisión atómica.

En los suelos, la determinación del pH en KCl 0,1 N se realizó con electrodo de vidrio, empleando una relación suelo:disolución de 1:2,5 y después de dos horas de reacción (Guitián y Carballas, 1976). Las determinaciones de C, S y N totales en suelos se realizaron con un autoanalizador Leco. Las concentraciones

**Tabla 2.** Ecuaciones alométricas de estimación de la biomasa y las fracciones arbóreas

Fracción	Ecuación	r <sup>2</sup>
Biomasa total	-3,38 + 1,82 LnDn + 0,97 LnH	0,98 (p < 0,001)
Madera	-4,83 + 1,72 LnDn + 1,43 LnH	0,99 (p < 0,001)
Corteza	1,11 - 0,80 LnDn	0,91 (p < 0,001)
Ramas gruesas	-3,75 + 2,01 LnDn	0,65 (p < 0,001)
Ramas finas	-3,99 + 1,89 LnDn	0,79 (p < 0,001)
Ramillos	-4,94 + 1,96 LnDn	0,66 (p < 0,001)
Acículas	-4,05 + 1,97 LnDn	0,73 (p < 0,001)
Restos de corta	-2,47 + 1,95 LnDn	0,81 (p < 0,001)

Dn: diámetro normal del árbol. H: altura del árbol.

de P, Ca, Mg y K asimilables se obtuvieron mediante el método Mehlich III (Mehlich, 1984). Las formas de Ca, Mg, Na y K que extrae este reactivo es idéntica a la del acetato amónico, mientras que el P extraído es comparable al de los métodos de Olsen o Bray (Sen Tran y Simard, 1993). La determinación de estos cationes de cambio se realizó en el extracto, mediante espectrofotómetro de absorción-emisión atómica.

### Evaluación del estado nutricional

El estado nutricional de las plantaciones se determinó comparando los niveles de concentración de los diferentes elementos obtenidos en las plantaciones con los ofrecidos como óptimos por Will (1985) en Nueva Zelanda, así como con los valores medios de plantaciones de *Pinus radiata* en Galicia (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2002).

Por otro lado, también se estimó el potencial productivo a través del Índice de Reserva de la Vegetación (IRV), para lo cual se siguió el método propuesto por Fassbender y Bornemisza (1987) y aplicado por Schlatter *et al.* (1998) a plantaciones de *Pinus radiata* en Chile.

$$\text{IRV} = \frac{\text{Reserva en vegetación} + \text{mantillo (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Reserva en el horizonte A (kg ha}^{-1}\text{)}}$$

Para los datos de la biomasa se tuvo en cuenta la totalidad producida en la plantación, para lo que se siguió la evolución de claras efectuadas, aplicándose las tablas de producción elaboradas para estas mismas plantaciones (Sánchez Rodríguez, 2001). Los índices superiores a 0,5 se consideran inestables. Para el C el valor de referencia es 3 (Schlatter *et al.*, 1998).

## Resultados y Discusión

### Acumulación de biomasa y nutrientes en la biomasa arbórea

#### *Estimación de la biomasa arbórea*

En la Tabla 2 se muestran las relaciones alométricas para la biomasa total y las diferentes fracciones arbóreas. Para la biomasa total y la madera, la ecuación que mejor se ajusta es del tipo  $\text{LnP} = \alpha + \beta \text{Ln Dn} + \chi \text{LnH}$ , mientras que para el resto de las fracciones los mejores ajustes se encontraron para el modelo  $\text{LnP} = \alpha + \beta \text{Ln Dn}$ , donde P es el peso de la fracción correspondiente, Dn es el diámetro normal y H, la altura del árbol. Estos modelos coinciden, en líneas generales, con los empleados por otros autores para esta misma especie en otros países (Madwick, 1983; Cromer *et al.*, 1985).

Las parcelas estudiadas presentan una cantidad total de biomasa arbórea que oscila entre 94 y 240 t ha<sup>-1</sup> (Tabla 3). La mayor acumulación se observa en la parcela 1, donde coincide una edad relativamente elevada con una densidad de árboles alta. Las menores cantidades se encuentran en las masas más jóvenes (parcelas 2 y 6). Para la misma edad, la acumulación de biomasa es, en general, inferior a la registrada en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile (Schlatter *et al.*, 1998). No obstante, es preciso considerar que en nuestras masas se practican claras, así como las mejores condiciones de los suelos chilenos.

La madera representa entre el 60 y el 74% del total de la biomasa arbórea. Este porcentaje aumenta linealmente con la edad del rodal ( $r = 0,79$ ;  $p < 0,05$ ). La corteza representa entre el 8 y el 10% del total de la biomasa. El peso del conjunto de ramas, acículas y pi-

**Tabla 3.** Cantidad de biomasa seca, en t ha<sup>-1</sup>, fraccionada en los diferentes componentes arbóreos de las 9 plantaciones de *Pinus radiata* estudiadas

Parcela	Madera	Corteza	Ramas gruesas	Ramas finas	Ramillos	Acículas	Conos	Biomasa total
1	172,6	19,8	15,2	8,3	4,1	7,6	11,9	239,5
2	58,6	8,6	8,4	4,9	2,3	6,7	4,4	93,9
3	122,3	12,4	11,4	6,5	3,1	6,6	8,3	170,6
4	112,0	14,1	11,8	6,6	3,2	9,2	6,1	163,0
5	165,5	16,4	13,4	7,5	3,7	6,2	11,2	223,9
6	63,8	11,1	9,8	5,5	2,7	7,2	5,6	105,7
7	108,2	11,8	8,2	4,4	2,2	3,6	6,8	145,2
8	95,7	11,7	10,2	5,7	2,8	6,4	6,9	139,4
9	102,3	12,1	11,0	6,2	3,0	7,1	7,3	149
Media	111,2	13,1	11,0	6,2	3,0	6,7	7,6	158,9

ñas (restos de corta), se cifra entre 25 y 53 kg ha<sup>-1</sup>, lo que representa entre el 17 y 29% de la biomasa arbórea (Tabla 3).

#### *Concentración de elementos en las diferentes fracciones arbóreas*

En la Tabla 4 se recogen las concentraciones de macronutrientes en los diferentes componentes aéreos del árbol. La madera es la fracción que presenta las menores concentraciones de elementos. Las mayores se encuentran en las acículas, si bien la corteza presenta niveles de Ca y Mg similares a las acículas. Las concentraciones de S, N y P disminuyen en el orden: acículas > piñas > ramillos > ramas = corteza > madera. En el caso de Ca y Mg el orden fue: acículas ≥ corteza > ramillos ≥ piñas > madera.

Todas las plantaciones estudiadas muestran niveles satisfactorios de N y K. Tres de las parcelas (1, 3 y 5) muestran niveles de P deficitarios (inferiores a 1,1 mg g<sup>-1</sup>), en cuatro plantaciones (1, 2, 4 y 5) se observan

concentraciones insuficientes de Mg (inferiores a 0,7 mg g<sup>-1</sup>) y en otras 2 (1 y 3), las concentraciones de Ca son inferiores al óptimo (1 mg g<sup>-1</sup>). Los bajos niveles foliares de P, Mg y Ca coinciden con las bajas concentraciones encontradas en los suelos y permiten explicar buena parte de la variabilidad productiva de estas masas en Galicia (Sánchez Rodríguez *et al.*, 2002). Estas deficiencias, especialmente las de P, son relativamente frecuentes en plantaciones de *P. radiata* sobre suelos de rocas silíceas de otras zonas de la Península Ibérica (Romanyá y Vallejo, 1996) y de otras zonas (Birk, 1994). Igualmente, coinciden con las tendencias observadas en plantaciones jóvenes de Galicia (Zás y Serrada, 2003).

#### *Cantidad de nutrientes contenidos en la biomasa arbórea*

Dada su mayor masa, la madera es la fracción del árbol donde se acumula la mayor cantidad de elementos (Figura 2). Si se considera la extracción de

**Tabla 4.** Valores medios (mg g<sup>-1</sup>) y desviaciones típicas de la composición química de las fracciones arbóreas en las 9 plantaciones de *Pinus radiata* estudiadas

	C	S	N	P	K	Ca	Mg
Madera	504 (7,2)	0,22 (0,12)	0,9 (0,5)	0,196 (0,15)	0,79 (0,13)	0,42 (0,34)	0,323 (0,34)
Corteza	541 (13)	0,55 (0,23)	3,5 (0,8)	0,294 (0,18)	2,72 (1,48)	1,26 (0,88)	0,655 (0,23)
Ramas gruesas	513 (8,2)	0,40 (0,10)	2,1 (0,5)	0,221 (0,18)	1,73 (0,50)	0,62 (0,28)	0,410 (0,05)
Ramas finas	525 (8,1)	0,58 (0,25)	3,5 (0,6)	0,340 (0,18)	2,57 (0,64)	0,81 (0,33)	0,502 (0,11)
Ramillos	532 (7,1)	0,74 (0,22)	5,5 (0,8)	0,549 (0,24)	3,63 (0,98)	0,70 (0,31)	0,644 (0,07)
Acículas	527 (6,1)	1,92 (0,38)	15,0 (1,3)	0,938 (0,21)	6,13 (1,20)	1,12 (0,73)	0,658 (0,18)
Piñas	535 (9,1)	0,80 (0,19)	6,8 (1,8)	0,627 (0,19)	1,47 (0,45)	0,31 (0,68)	0,558 (0,15)

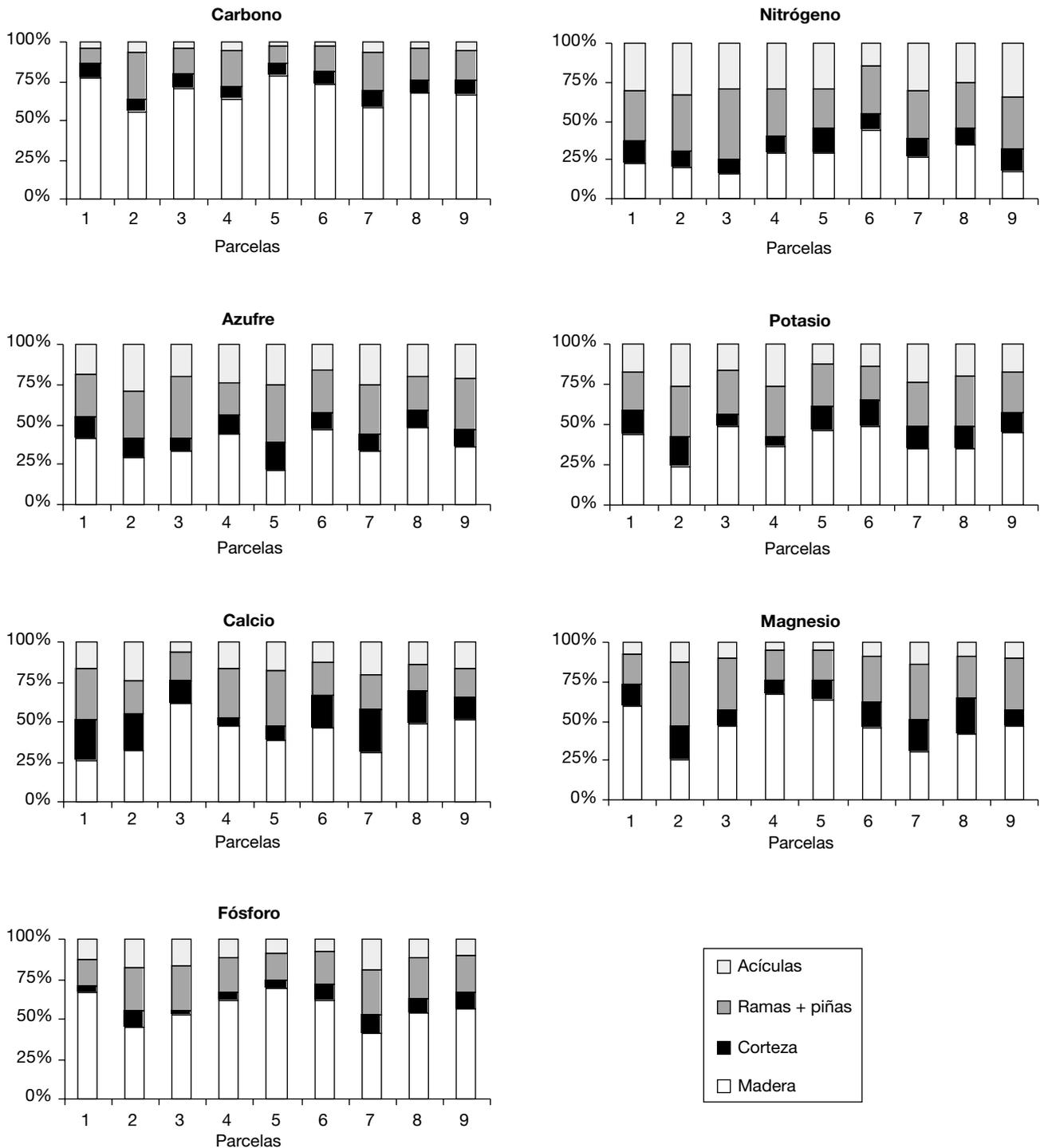


Figura 2. Reparto porcentual de los nutrientes en la biomasa arbórea.

madera con corteza, el aprovechamiento de estas dos fracciones supone la retirada de 40-77% de todos los elementos presentes en el árbol. Esto es especialmente importante en el caso del C (77%), P (63%) y Mg (63%). Si se contemplara devolver la corteza al

terreno, estas extracciones serían 68, 55 y 47%, respectivamente.

El conjunto de fracciones que componen los restos de corta (corteza, ramas, acículas), aunque representa tan solo la cuarta parte de la biomasa, acu-

mula cantidades substanciales de nutrientes. De este modo, las ramas y acículas incluyen la mayor parte del N y el S acumulados por la plantación (60 y 51%, respectivamente), así como cantidades importantes de otros elementos, como K (47%), Mg (37%), P (37%) y Ca (36%).

Estos resultados se pueden comparar con las plantaciones de esta especie en otras zonas, como Chile (Schlatter *et al.*, 1998), Australia o Nueva Zelanda (Turner y Lambert, 1986). Al igual que en esos casos, las plantaciones de ese estudio muestran las mayores acumulaciones de Ca, Mg y K en el fuste. La principal diferencia se basa en el mayor contenido de P en los restos de corta de las plantaciones chilenas. Tendencias similares se observa en plantaciones de *Pinus pinaster* en el centro de España (Montero *et al.*, 1999) y en las Landas francesas (Lemoine *et al.*, 1988). Los datos también se pueden comparar con los obtenidos en Galicia para plantaciones de *Eucalyptus globulus* (Brañas *et al.*, 2000). Con respecto a esta última especie, la principal diferencia radica en las mayores cantidades de N, Ca y Mg que se acumulan en corteza y hojas de los eucaliptos.

### Acumulación de biomasa y nutrientes en el horizonte orgánico

Los datos referentes al mantillo orgánico (horizonte O del suelo) se recogen en la Tabla 5. El mantillo de estas masas está formado fundamentalmente por acículas y algunas ramas de tamaño medio en diferentes fases de descomposición. El peso de este horizonte, que oscila entre 27 y 65 t/ha, se relacio-

na con la edad de la plantación ( $r = 0,75$ ;  $p < 0,05$ ). Estos resultados coinciden en líneas generales con los de Schlatter *et al.* (1998) para plantaciones de *Pinus radiata* en Chile, aunque estos autores también observaron, en un área más amplia, la importancia de la altitud sobre la acumulación de hojarasca en el suelo.

En comparación con los niveles en acículas, las concentraciones de elementos en el horizonte orgánico son algo inferiores, especialmente en el caso del K. Estas menores concentraciones se deben probablemente a la retranslocación previa al desfronde, así como a las pérdidas durante el proceso de descomposición (Cortina y Vallejo, 1994; Ouro *et al.*, 2001). En este sentido, esos estudios muestran que el elemento que más rápidamente se pierde durante la descomposición es el K, seguido del Ca y Mg y, por último, N y P.

### Propiedades de los suelos y reserva de nutrientes

En la Tabla 6 se recogen los diferentes tipos de horizontes y suelos, mientras que la Tabla 7 muestra los valores del horizonte mineral superficial (A o A<sub>1</sub>) para cada una de las nueve parcelas estudiadas. Las profundidades de la mayor parte de los suelos se encuentran entre 50 y 85 cm. Tan solo el suelo de la parcela 5, con 30 cm de espesor, presenta una limitación importante por profundidad. Las densidades aparentes son relativamente bajas, normalmente entre 1 y 1,2 g cm<sup>-3</sup>, como corresponde a los suelos forestales de esta zona; si bien, se puede señalar las mayores densidades encontradas en algunos suelos de granitos en

**Tabla 5.** Valores medios del peso seco (t ha<sup>-1</sup>) y de la composición química (mg g<sup>-1</sup>) de los mantillos (horizontes orgánicos O) de las 9 plantaciones de *Pinus radiata* consideradas en este trabajo

Parcela	Peso	C	S	N	P	K	Ca	Mg
1	41,5	482,3	1,96	12,4	0,83	0,88	1,98	0,52
2	26,7	434,8	1,58	11,1	0,87	0,98	2,24	0,60
3	37,8	432,4	1,74	11,9	0,87	0,96	2,08	0,48
4	36,3	462,8	1,85	13,3	0,67	1,16	1,72	0,68
5	34,0	427,0	1,73	12,0	0,82	0,97	1,75	0,52
6	43,1	414,3	1,72	12,9	0,73	1,06	1,48	0,78
7	65,0	471,8	1,93	12,8	0,69	0,76	1,60	0,52
8	30,6	459,5	1,80	12,7	0,81	1,02	1,52	0,62
9	31,5	485,0	1,92	13,5	0,67	0,92	1,36	0,44
Media	38,5	452,5	1,80	12,5	0,77	0,97	1,75	0,57

**Tabla 6.** Material de partida y tipos de suelos (FAO/Unesco, 1998) en las parcelas de *Pinus radiata* estudiadas

Parcela	Material de partida	Horizontes/prof. (cm)	Clasificación
1	Esquistos	A (0-25), B <sub>1</sub> (25-60), B <sub>2</sub> (60-85)	Cambisol dístico
2	Esquistos	A (0-20), AB (20-45), B (45-65)	Cambisol dístico
3	Esquistos	A <sub>1</sub> (0-20), A <sub>2</sub> (20-55), A <sub>3</sub> (55-75)	Regosol dístico
4	Esquistos	A (0-15), AB (15-40), B (40-60)	Cambisol dístico
5	Esquistos	A <sub>1</sub> (0-15), A <sub>2</sub> (15-30)	Regosol léptico
6	R. graníticas	A <sub>1</sub> (0-25), A <sub>2</sub> (25-40), A <sub>3</sub> (40-75)	Umbrisol húmico
7	R. graníticas	A (0-25), AB (25-50), B (50-70)	Umbrisol húmico
8	R. graníticas	A <sub>1</sub> (0-20), A <sub>2</sub> (20-40), A <sub>3</sub> (40-60)	Umbrisol húmico
9	Esquistos	A <sub>1</sub> (0-10), A <sub>2</sub> (10-30), B (30-50)	Cambisol dístico

virtud de su mayor contenido en arena. Los suelos presentan una pedregosidad variable, normalmente superior al 30%. La estructura de los horizontes superficiales es granular y débil, mientras que en los horizontes más profundos consiste en bloques de tamaño pequeño y mediano.

El contenido de C orgánico en la mayor parte de los suelos es moderado o alto. Tan solo la parcela 5 presenta niveles que pueden considerarse algo bajos. Los niveles de N total siguen la misma tendencia que los del C. Las relaciones C/N de todos los suelos son inferiores a 21, lo que indica que los procesos de descomposición y mineralización son adecuados, aspecto que afecta especialmente al N.

En todas las parcelas, el nivel de P en el horizonte A es inferior a 20 mg kg<sup>-1</sup> y, normalmente, menor de 10 mg kg<sup>-1</sup>, lo que puede considerarse como muy bajo. La baja disponibilidad de P se debe, en parte, a problemas de solubilidad de este elemento como consecuencia de la fuerte acidez de los suelos. En este sentido, todas las parcelas presentan niveles de pH inferiores al rango óptimo de solubilidad de este elemento, que se encuentra entre 5,0 y 7,0.

Los bajos niveles de pH, por una parte, reflejan una baja reserva de elementos básicos (K, Ca y Mg) en los suelos y, por otra, indican niveles elevados de Al en el suelo que limitan el desarrollo de las raíces. Las características descritas se corresponden, en líneas generales, con las observadas en otros estudios que incluyen suelos forestales de la zona oceánica de Galicia (Guitián Ojea *et al.*, 1982; Macías y Calvo, 1992; Brañas *et al.*, 2000).

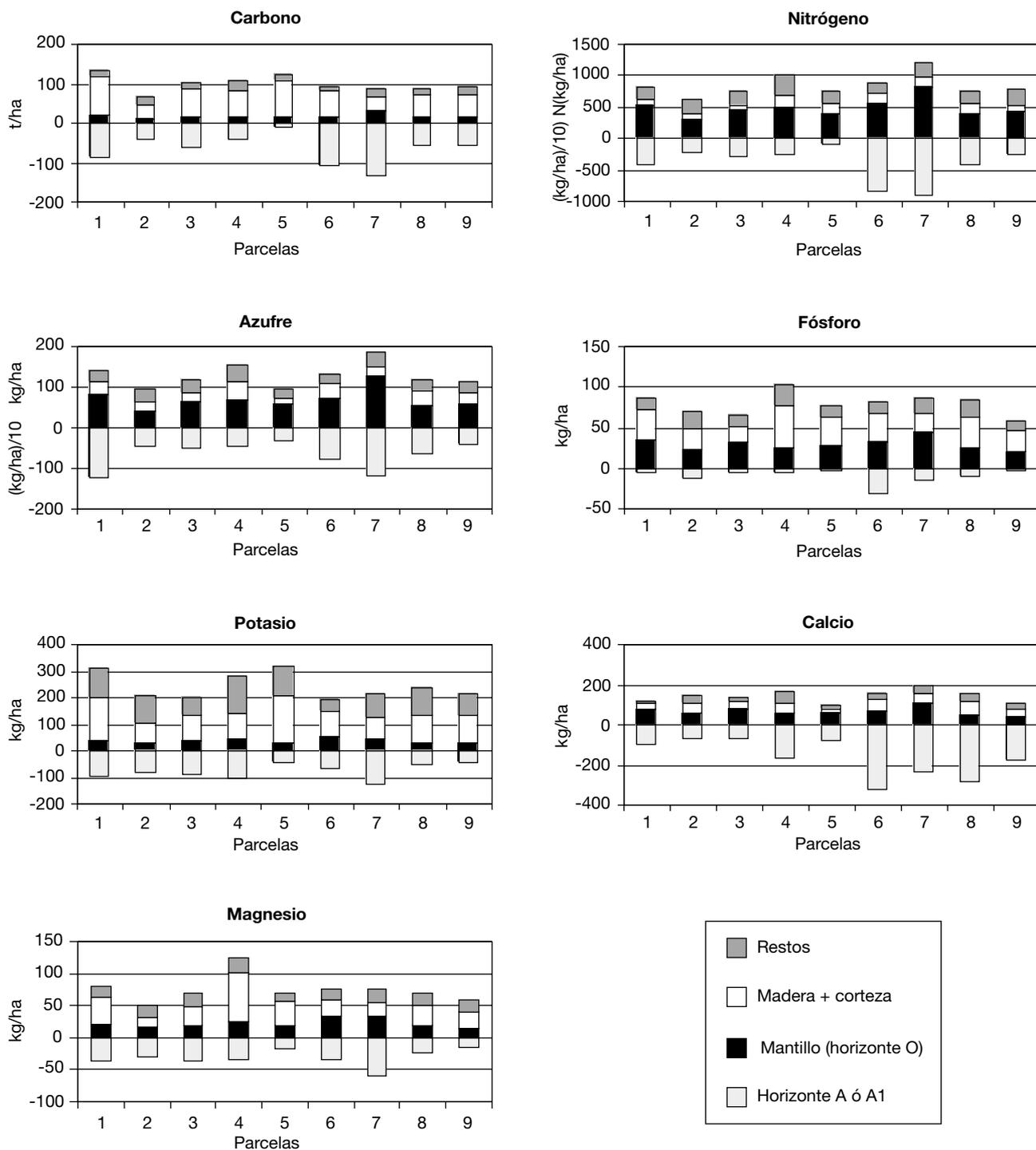
### Contenidos de nutrientes en biomasa y su relación con los suelos

La comparación de las cantidades de nutrientes en la biomasa con respecto a la reserva de éstos en los suelos permite valorar las limitaciones nutricionales en las diferentes parcelas. De este modo, la Figura 3 muestra las cantidades de elementos acumulados en la biomasa frente a las cantidades totales (N y S) o disponibles (P, K, Ca, Mg) en los horizontes superficiales (A o A<sub>1</sub>) de los suelos. Las reservas de N y S en el suelo son muy superiores a las cantidades

**Tabla 7.** Propiedades de los horizontes superficiales (A ó A<sub>1</sub>) de los suelos en las plantaciones estudiadas

Parcela	Pedreg. (%)	D.A. (g cm <sup>-3</sup> )	pK <sub>KCl</sub>	C* (%)	S* (%)	N* (%)	C/N (mg kg <sup>-1</sup> )	P** (mg kg <sup>-1</sup> )	Ca** (mg kg <sup>-1</sup> )	Mg** (mg kg <sup>-1</sup> )	K** (mg kg <sup>-1</sup> )
1	6	1,12	3,9	3,3	0,04	0,16	20	1,9	36	14	36
2	38	1,20	3,9	2,7	0,03	0,16	17	8,2	48	20	56
3	28	1,13	3,7	3,7	0,03	0,17	21	2,8	40	22	54
4	17	0,98	3,7	3,4	0,04	0,21	16	4,0	132	28	84
5	46	1,10	3,7	1,4	0,04	0,10	14	3,1	84	20	46
6	24	0,99	3,9	5,6	0,04	0,44	13	16,1	170	18	36
7	17	1,30	4,1	5,0	0,04	0,33	15	5,7	86	22	48
8	29	0,90	4,1	4,5	0,05	0,33	14	8,0	222	18	40
9	24	1,19	3,4	6,0	0,05	0,29	20	3,8	194	16	46

\* Concentraciones totales. \*\* Concentraciones extraíbles.



**Figura 3.** Distribución de nutrientes en el sistema forestal. En el horizonte superficial del suelo (A o A<sub>1</sub>), C, N y S, cantidades totales; P, K, Ca y Mg, cantidades asimilables.

de estos nutrientes acumulados en la biomasa. Esto es así, incluso si se considera que la proporción del N que es potencialmente mineralizable es alrededor del 40% del N total del suelo (Waring y Schlesinger,

1985). En este sentido, la mineralización de N estimada en zonas de clima templado (Pastor *et al.*, 1984) y que en Galicia se ha cifrado en 19 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Pérez-Batallón *et al.*, 2001), es suficiente para res-

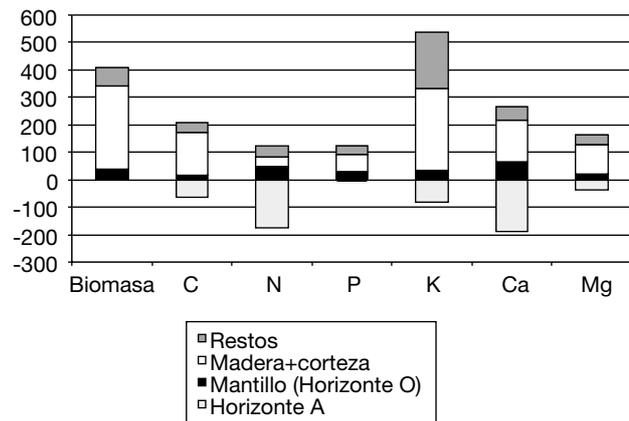
tituir la extracción de este elemento a lo largo de la rotación.

Una situación muy diferente es la presentada por elementos como el P, K y Mg. Las reservas de estos elementos en los suelos son inferiores a sus acumulaciones en la biomasa arbórea (Figura 3). El Ca presenta una situación variable entre las diferentes parcelas, encontrándose en buenas cantidades en los suelos de algunas parcelas y siendo bajas en otras. En relación con estos datos, un reciente estudio a nivel cuenca en Galicia (de condiciones climáticas y edáficas similares a la zona del presente estudio) ha mostrado que los aportes por lluvia y alteración mineral no son suficientes para reponer la extracción de Ca y Mg por la biomasa acumulada en plantaciones de rápido crecimiento (Dambrine *et al.*, 2000).

Un aspecto relevante es la importante acumulación de elementos en el horizonte orgánico del suelo. La acumulación en este componente llega a ser especialmente relevante en el caso del N y S, elementos para los que este horizonte incluye cantidades superiores a las acumuladas por la biomasa arbórea. Para el Ca, Mg y P las cantidades incluidas en el mantillo representan aproximadamente el tercio de las cantidades incluidas en la biomasa.

Como se ha comentado en el apartado de material y métodos, las plantaciones estudiadas fueron establecidas con diferentes densidades y en ellas se realizaron cortas parciales. Por este motivo, la biomasa y las cantidades de elementos acumuladas en ella están influenciadas por la gestión de cada una de las masas. Con el propósito de conocer las cantidades producidas de las diferentes fracciones a lo largo de la rotación se aplicó una tabla de producción para biomasa elaborada a partir de los datos de estas mismas plantaciones (Sánchez Rodríguez, 2001). Para ello se ha considerado la biomasa producida por una hipotética plantación que parte de una densidad media (2.200 pies ha<sup>-1</sup>), de índice de sitio 21 m y una edad de 35 años (Figura 4). En esta hipotética plantación se puede observar que las cantidades de P, K y Mg acumuladas en biomasa y mantillo son substancialmente superiores a las cantidades disponibles en el horizonte A del suelo. Las cantidades de Ca acumuladas en biomasa y en el suelo son similares. Por último, las cantidades de N total en el suelo son muy superiores a las de la biomasa.

Utilizando los índices de estabilidad de Fassbender y Bornemisza (1987), empleado por Schlatter *et al.* (1998) para plantaciones de esta especie, se comprue-



**Figura 4.** Distribución de nutrientes en un hipotético sistema forestal, considerando la producción de madera y restos durante una rotación. Se ha considerado una plantación de 35 años de edad, de índice de sitio de 21 m y con una densidad inicial de 2.200 pies ha<sup>-1</sup>. En el suelo, C, N y S, cantidades totales; P, K, Ca y Mg, cantidades asimilables. C (t ha<sup>-1</sup>), N (kg ha<sup>-1</sup> 10<sup>-1</sup>), resto de elementos (kg ha<sup>-1</sup>).

ba la inestabilidad de estas plantaciones para P, Mg y K, cuyos índices se cifran en 9,4, 3,3 y 4,5, respectivamente. Para el Ca, las plantaciones son también inestables, aunque en menor medida (índice 0,9). Es importante señalar que estos resultados se relacionan con el estado nutricional de las masas de *Pinus radiata* en Galicia, en las cuales son frecuentes los niveles deficitarios de P y Mg y, en menor medida, de Ca (Sánchez Rodríguez *et al.*, 2002). La única excepción la constituye el K. A pesar de que según este índice el sistema es inestable para este elemento, éste no suele ser un elemento deficitario en estas plantaciones. Como se puede apreciar en las Figuras 3 y 4, a diferencia de otros elementos, el K se acumula de manera importante en los restos de corta y en el mantillo. Por este motivo, es posible que la descomposición de estos componentes suponga una importante restitución de K al suelo, especialmente si se considera la rápida liberación de este elemento durante las primeras etapas de descomposición y mineralización de la hojarasca (Cortina y Vallejo, 1994).

La situación descrita es similar a la que presentan las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Galicia, también con niveles deficitarios de P, Mg y Ca (Brañas *et al.*, 2000). Sin embargo, es considerablemente diferente a la que se observa en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile (Schlatter *et al.*, 1998), donde los suelos contienen cantidades disponibles de nutrientes superiores a los acumulados por la biomasa arbórea, aspecto que coincide con un satisfactorio estado

nutricional de estas masas y con índices de sitio superiores a las plantaciones de este estudio.

Además, de estas implicaciones nutricionales el inventario de elementos recoge el reparto del C orgánico en la biomasa arbórea y en el suelo. Las Figuras 3 y 4 revelan que el horizonte superficial del suelo llega a acumular cantidades de C comparables a la biomasa arbórea. Si se considera el resto de los horizontes, se comprueba que la acumulación de C en el suelo es considerablemente superior a la biomasa.

### **Implicaciones sobre la gestión selvícola de *Pinus radiata* en Galicia**

Los resultados de este trabajo confirman que las frecuentes deficiencias de P, Mg y Ca en estas plantaciones se deben a un suministro limitado de estos nutrientes por parte del suelo. Las bajas reservas de elementos en los suelos se atribuyen al fuerte lavado al que están sometidos, así como a la baja alterabilidad de los minerales de los materiales geológicos de partida (Macías y Chesworth, 1992; Dambrine *et al.*, 2000). Al igual que ocurre en las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en esta misma región, se pone de manifiesto la fragilidad nutricional de estos suelos y la dependencia de los aportes de elementos a través de la descomposición y mineralización de los residuos orgánicos.

Los datos del presente trabajo sugieren que la gestión selvícola en Galicia, donde los sistemas forestales de especies de rápido crecimiento presentan una marcada inestabilidad nutricional, debe asegurar la restitución de la mayor parte de los elementos extraídos durante el aprovechamiento forestal. Esta restitución se puede realizar mediante la apropiada gestión de los restos de corta y/o programas de fertilización.

El presente estudio, junto con otros de otras áreas (p.e., Freedman *et al.*, 1987; Augusto *et al.*, 2000), revelan la importante acumulación de nutrientes en los restos de corta. La descomposición sobre la superficie del terreno de estas fracciones permite restituir buena parte de los elementos que se extraen durante el aprovechamiento. De hecho, los aportes de nutrientes durante la descomposición de los restos de corta son suficientes para abastecer las necesidades de estas plantaciones durante varios años de la rotación (Ouro *et al.*, 2001). El aprovechamiento más frecuente de las masas de *Pinus radiata* en Galicia consiste en la retirada de madera y corteza durante las cortas parciales y finales,

si bien, en algunas ocasiones se retiran los restos junto con el mantillo forestal. A diferencia de lo que ocurre en las plantaciones de *Eucalyptus globulus*, la restitución de la corteza al suelo no supone una substancial reducción de la extracción de nutrientes.

En los últimos años se está planteando el aprovechamiento de biomasa no maderable para fines industriales y energéticos. A la vista de los resultados de este trabajo, y de otros anteriores, parece conveniente establecer programas de fertilización a lo largo de la rotación que compensen las importantes extracciones de nutrientes que conlleva esta práctica.

La fertilización que normalmente se practica en esta especie, consistente en 100-150 g de fertilizante NPK por planta en el momento del establecimiento, no es suficiente para proporcionar un estado nutricional óptimo, puesto que a los pocos años las plantaciones vuelven a manifestar niveles deficientes (Zás y Serrada, 2003). Los datos de este trabajo, junto con otros anteriores que muestran las frecuentes deficiencias de P, Mg y Ca, sugieren la conveniencia de practicar fertilizaciones en fases posteriores al establecimiento, tal como se realiza en otras áreas, como Australia (Birk, 1994), especialmente si el aprovechamiento contempla la retirada de restos de corta.

Por otro lado, los restos de corta también ofrecen una eficaz protección frente a la erosión, aspecto que reviste importancia en la región, dado que muchas de las plantaciones se encuentran en laderas de pendiente acusada (Edeso *et al.*, 1999).

Por último, es preciso considerar la importante función de los sistemas forestales sobre la asimilación de C atmosférico, aspecto en el que puede intervenir la gestión de restos de corta que se practique. Está ampliamente reconocido el importante papel de los sistemas forestales sobre el balance de CO<sub>2</sub> (y de otros gases, como CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) en la atmósfera, por su capacidad de retener este gas a través de la fijación en biomasa y de su incorporación al suelo, donde puede residir cientos de años (Bouwman, 1990). En este sentido, muchos de los sistemas forestales, como los del presente trabajo, acumulan la mayor parte del C orgánico en el suelo. El mantenimiento de los restos de corta sobre la superficie del terreno, o su incorporación al suelo, contribuiría a incrementar la reserva de C en los suelos. Parte del C orgánico de los residuos se incorporarán como materia orgánica al suelo (Mattson and Swank, 1989; Romanyá *et al.*, 2000), mientras que al mismo tiempo se reduce la tasa de mineralización de materia orgánica, por su efecto de

amortiguación de la temperatura del suelo (Hendrickson *et al.*, 1985; Pérez-Batallón *et al.*, 2001).

## Conclusiones

En el presente trabajo se recogen diferentes modelos alométricos que permiten relacionar la biomasa de cada fracción arbórea con el diámetro normal y la altura del árbol para plantaciones de *Pinus radiata* en Galicia. Estas ecuaciones se pueden emplear para estimar las cantidades de biomasa existentes para considerar su gestión más conveniente en cada caso. Del mismo modo, se pueden emplear para realizar estimas reales de la acumulación de C en biomasa arbórea.

Los contenidos de nutrientes en biomasa arbórea y suelo han permitido estimar la distribución de nutrientes en este tipo de sistemas y valorar la estabilidad desde el punto de vista nutricional. Los datos revelan una marcada inestabilidad para P y Mg, lo que coincide con los frecuentes casos de deficiencias para estos elementos. De igual modo, se pone de manifiesto la importante acumulación de nutrientes en los restos de corta. Estos hechos sugieren la conveniencia de realizar labores selvícolas que consideren la restitución de nutrientes, a través de la gestión de los restos de corta y/o el aporte de nutrientes mediante la fertilización. Esto último parece especialmente conveniente en aquellas masas en que las condiciones de mecanización, riesgo de erosión, posibilidades económicas y otras permitan el aprovechamiento de los restos con fines energéticos o industriales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda prestada en las labores de campo a Azahara Soilán, Carlos López, Fernando Castedo, Fernando Solla y Manuel Fontao, de la Escuela Politécnica Superior de Lugo. De igual modo, agradecen las valiosas sugerencias planteadas por los dos revisores anónimos del artículo.

## Referencias bibliográficas

- AUGUSTO L., RAGER J., PONETTE Q., RAPP M., 2000. Relationships between forest tree species, stand production and stand nutrient amount. *Ann. For. Sci.* 57, 313-324.
- BERMÚDEZ ALVITE J., PIÑEIRO VEIRAS G., 2000. La biomasa forestal en Galicia. Situación actual y perspectivas de aprovechamiento. *Revista CIS-Madera (Ourense)*, 5, 27-40.
- BIRK E.M., 1994. Fertiliser use in the management of pine and eucalypt plantations in Australia: a review of past and current practices. *N. Z. J. For. Sci.* 24, 289-320.
- BOUWMAN, A.F., 1990. Soils and the greenhouse effect. John Wiley & Sons, Nueva York.
- BRAÑAS J., GONZÁLEZ-RÍO F., MERINO A., 2000. Contenido de nutrientes en biomasa vegetal y suelos de plantaciones de *Eucalyptus globulus* en el norte de Galicia. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* 9, 317-335.
- CARBALLEIRA A., DEVESA C., RETUERTO R., SANTILLÁN E., UCIEDA F., 1983. Bioclimatología de Galicia. Fundación Barrié de la Maza, A Coruña.
- CORTINA J., VALLEJO V.R., 1994. Effects of clearfelling on forest floor accumulation and litter decomposition in a radiata pine plantation. *For. Ecol. Manage.*, 70, 299-310.
- CROMER, R.N., BARR, N.J., WILLIAMS, E.R., MCNAUGHT, A.M., 1985. Response to fertiliser in a *Pinus radiata* plantation. Above-ground biomass and wood density. *N. Z. J. For. Sci.* 15, 59-70
- CUNIA, T., 1988. On the error of biomass regressions and the corresponding inventory estimates. In: *Proc. 9<sup>th</sup> Annual Southern Forest Biomass. Workshop* (Daniels, R.A., Watson, W.F y Savelle, I.W, eds.) Mississippi State Univ. pp. 93-109.
- DAMBRINE E., VEGA J.A., TABOADA T., RODRÍGUEZ L., FERNÁNDEZ C., MACÍAS F., GRAS J.M., 2000. Biliens d'éléments minéraux dans de petits bassins versants forestiers de Galice (NW Espagne). *Ann. Sci. For.* 57, 23-38.
- EDESOS J.M., MERINO A., GONZÁLEZ M.J., MARAURI P., 1999. Soil erosion under different harvesting managements in steep forestlands from Northern Spain. *Land Degrad. Develop.* 10, 79-88.
- FAO-UNESCO, 1998. Clasificación de suelos FAO. Base de referencia para los suelos del Mundo. *World Reference for Soil Resource*. FAO, Roma.
- FASSBENDER H., BORNEMISZA E., 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, 420 p.
- FREEDMAN B., MORASH R., HANSON A.J., 1981. Biomass and nutrient removals by conventional and whole-tree clear-cutting of a red-spruce-balsam fir stand in central Nova Scotia. *Can. J. For. Res.* 11, 249-257.
- GUITIÁN F., CARBALLAS T., 1976. Técnicas de análisis de suelos. Pico Sacro. Santiago de Compostela, España.
- GUITIÁN OJEA F., CARBALLAS FERNÁNDEZ T., MUÑOZ TABOADELA M., 1982. Suelos de la provincia de Lugo. Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia. Santiago de Compostela, España.
- HENDRICKSON O.Q., CHATAPPAUL L., ROBINSON J.B., 1985. Effects of two methods of timber harvesting on microbial processes in forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 739-746.
- HOPMANS P., STEWART H.T.L., FLINN D.W., 1993. Impacts of harvesting on nutrients in a eucalypt ecosystem in southeastern Australia. *For. Ecol. Manage.* 59, 29-51.

- I.P.C.C. (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE), 2000. Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura: resumen para responsables de políticas. Informe especial del IPCC, OMM-PNUMA, Ginebra.
- LEMOINE B., RANGER J., GELPE J., 1988. Distribution qualitative et quantitative des éléments nutritifs dans un jeune peuplement de pin maritime (*Pinus pinaster* Ait). Ann. Sci. For. 45, 95-116.
- LÓPEZ SÁNCHEZ C., 2001. Caracterización de las distribuciones diamétricas de las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Proyecto fin de carrera de Ingeniería de Montes. Escola Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela.
- MACÍAS F., CALVO R., 1992. Suelos de la provincia de La Coruña. Diputación de La Coruña.
- MACÍAS F., CHESWORTH W., 1992. Weathering in humid regions, with emphasis on igneous rocks and their metamorphic equivalents. In: Weathering, Soils and Paleosols. (Martini L. y Chesworth W., eds.) Elsevier, Amsterdam, pp. 283-306.
- MADWICK H.A.I., 1983. Estimation of the oven-dry weight of stems, needles, and branches of individual *Pinus radiata* trees. N. Z. J. For. Sci. 13, 108-109.
- MATTSON K.G., SWANK W.T., 1989. Soil and detrital carbon dynamics following forest cutting in the Southern Appalachians. Biol. Fertil. Soils 7, 247-253.
- MEHLICH A., 1984. Mehlich N° 3 extractant: a modification of Mehlich N° 2 extractant. Comm. Soil Sci. Plant. Anal. 15, 1409-1416.
- MERINO A., EDESIO J.M., 1999. Soil fertility rehabilitation in young *Pinus radiata* plantations from northern Spain after intensive site preparation. For. Ecol. Manage. 116, 83-91.
- MONTERO G., ORTEGA C., CAÑELLAS I., BACHILLER A., 1999. Productividad aérea y dinámica de nutrientes en una repoblación de *Pinus pinaster* Ait. sometida a distintos regímenes de claras. Invest. Agr.: Sist. Recur. For., Fuera de Serie n° 1.
- OURO G., PÉREZ-BATALLÓN P., MERINO A., 2001. Effects of silvicultural practices on nutrient status in a *Pinus radiata* plantation: nutrient export by tree removal and nutrient dynamics in decomposing logging residues. Ann. For. Sci. 58, 411-422.
- PASTOR J., ABER J.D., MCCLAUGHERTY C.A., MELILLO J.M., 1984. Aboveground production and N and P cycling along a nitrogen mineralization gradient on Blackhawk Island, Wisconsin. Ecology 65, 256-268.
- PÉREZ-BATALLÓN P., OURO G., MACÍAS F., MERINO A., 2001. Initial mineralization of organic matter in a forest plantation soil following different logging residue management techniques. Ann. For. Sci. 58, 807-818.
- ROMANYÁ J., CORTINA J., FALLON P., COLEMAN K., SMITH P., 2000. Modelling changes in soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on mediterranean agricultural soils. Eur. J. Soil Sci. 51, 627-641.
- ROMANYÁ J., VALLEJO R., 1996. Nutritional status and deficiency diagnosis of *Pinus radiata* plantations in Spain. Forest Sci. 42, 1-6.
- SÁNCHEZ RODRÍGUEZ F., 2001. Crecimiento y producción de *Pinus radiata* en Galicia. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela.
- SÁNCHEZ RODRÍGUEZ F., LÓPEZ C., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., ESPAÑOL E., MERINO A., 2001. Influence of edaphic factors on the productivity of *Pinus radiata* D. Don plantations in NW Spain. For. Ecol. Manage. 171, 181-189.
- SCHLATTER J.E., GERDING V., OÑATE M.I., 1998. Características y variabilidad de sitios con plantaciones adultas de *Pinus radiata* D. Don en suelos graníticos de las Regiones VIII y IX. Bosque (Valdivia, Chile) 19, 37-59.
- SEN TRAN T., SIMARD R.R., 1993. Mehlich III-extractable elements. In: Soil Sampling and Methods of Analysis. (Carter M. R., ed.) Canadian Soc. Soil Sci. Lewis Pub., Florida.
- TURNER, J., LAMBERT, M.J., 1986. Effects of forest harvesting nutrient removals on soil nutrient reserves. Oecologia 70, 140-148.
- TUTTLE C.L., GOLDEN M.S., MELDAHL R.S., 1985. Surface soil removal and herbicide treatments: effects on soil properties and loblolly pine early growth. Soil Sci. Soc. Am. 49, 1558-1562.
- WARING R.H., RUNNING S.W., 1998. Forest ecosystems: analysis at multiple scales. 2nd ed. Academic Press, San Diego, CA. 370 p.
- WARING R.H., SCHLESINGER W.H., 1985. Forest Ecosystems. Academic Press, Orlando, FL.
- WILL G.M., 1985. Nutrient deficiencies and fertiliser use in New Zealand exotic forests. FRI bulletin N° 97. Rotorua, New Zealand. 53 pp.
- XUNTA DE GALICIA, 2001. Monte Galego en cifras. Consellería de Medio Ambiente. Santiago de Compostela.
- ZÁS R., SERRADA, R., 2003. Foliar nutrient status and nutritional relationships of young *Pinus radiata* D. Don plantations in northwest Spain. For. Ecol. Manage. 174, 167-176.