

## Respuesta inicial del aporte de cenizas de biomasa arbórea en el estado nutricional de una plantación joven de *Pinus radiata* D. Don

F. Solla-Gullón\*, M. P. Taboada, R. Rodríguez-Soalleiro y A. Merino

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

### Resumen

El objetivo del presente ensayo fue evaluar la respuesta del empleo de cenizas de corteza de madera como enmendante y fertilizante de una plantación joven de *Pinus radiata* que se desarrolla sobre un suelo forestal ácido. El trabajo consistió en un ensayo de campo, con aporte de dos dosis de cenizas en cobertera (5.000 kg ha<sup>-1</sup> y 10.000 kg ha<sup>-1</sup>) y una dosis de fertilizante mineral NPK 8:24:16 (200 g en hoyo) en el momento del establecimiento de la plantación. Durante 28 meses se evaluó la respuesta de la fracción sólida del suelo y de la composición química de las acículas. El aporte de cenizas derivó en aumentos temporales del pH y de la concentración de Ca, Mg, P y K disponible en el suelo. Esta mejora de las propiedades químicas del suelo se tradujo en incrementos temporales en la concentración de Ca y, en menor medida, de Mg en las acículas. Como posible diagnóstico, el análisis de vectores de los contenidos y concentraciones de nutrientes foliares mostró que estos dos elementos limitaban el crecimiento de la especie.

**Palabras clave:** cenizas de biomasa, fertilización forestal, nutrición forestal, análisis foliar, análisis de vectores, *Pinus radiata*.

### Abstract

#### Initial response on nutritional status of a young *Pinus radiata* D. Don plantation to wood-ash application

The aim of the present study was to evaluate the effects of the application of wood-bark ash as a amendment and fertilizer of a young plantation of *Pinus radiata* grown on an acid soil. Two different doses of ash (5.000 and 10.000 kg ha<sup>-1</sup>) and one dose of 8:24:16 NPK fertilizer (200 g in hole) were applied at establishment. The response of the soil solid fraction and foliar chemical composition was studied throughout 28 months. Fertilization of the soil with wood-bark ash produced an increase in soil pH, at the same time increasing the availability of Ca, Mg, P and K. Related to this increase, the needle levels of Ca and, in a lower extent, Mg were also higher. Possible diagnosis of vector analysis of foliar nutrient contents and concentrations showed that these two elements limited the species growth.

**Key words:** wood ash, forest fertilization, forest nutrition, foliar analysis, vector analysis, *Pinus radiata*.

### Introducción

Las industrias de tableros y pulpa de papel generan cantidades importantes de cenizas de biomasa arbórea durante la combustión de restos madereros, principalmente de corteza. Estas cenizas se consideran un residuo no peligroso (Ministerio de Medio Ambiente, 2002), del que se generan en Galicia una cantidad estimada de 40.000 a 50.000 t año<sup>-1</sup> (Datos de la Asociación Galega Monte-Industria, comunicación personal). Se trata, por tanto, de una cifra muy elevada si la comparamos con la producción de cenizas en

países de mayor extensión forestal, como Finlandia (100.000 t año<sup>-1</sup>) (Moilanen *et al.*, 2002), Suecia (150.000 t año<sup>-1</sup>) (Holmberg y Claesson, 2002), Suiza (25.000 t año<sup>-1</sup>) (SAEFL, 1999) o Estados Unidos (3.800.000 t año<sup>-1</sup>) (NCASI, 1999). Si bien en España no se dispone de datos concretos referidos a la producción anual de cenizas, los datos correspondientes a la producción de energía resultante de la combustión de biomasa pueden ofrecer una indicación sobre las cantidades generadas. Así, según datos proporcionados por la Asociación de Productores de Energías Renovables, la biomasa generada en 1998 fue de 1.139 Gwh, estimándose para el 2010 la cifra de 13.949 Gwh (en este apartado se incluyen también otros biocombustibles además de

\* Autor para la correspondencia: fersogu@lugo.usc.es

Recibido: 29-04-03; Aceptado: 28-01-04.

los residuos de madera como aceites vegetales y residuos agrícolas).

Como alternativa a su transporte a vertedero, la aplicación de estas cenizas en terrenos agrícolas y forestales aparece como una prometedora vía de revalorización de este residuo. Diferentes investigaciones muestran el poder fertilizante y encalante de este tipo de cenizas de madera debido a sus características alcalinas, altas concentraciones de Ca, Mg, K y, en menor medida, P (Campbell, 1990; Lerner y Utzinger, 1986; Naylor y Schmidt, 1986; Etiégni y Campbell, 1991). Se pueden destacar también las bajas concentraciones de metales pesados (Vance, 1996). En cualquier caso, se trata de un material muy heterogéneo, cuyas propiedades físico químicas dependen de varios factores, como la fracción de biomasa que se emplee (corteza, madera, ramas), tipo de especie forestal y sistema de combustión (Campbell, 1990).

El modelo de silvicultura más extendido en el norte de España se basa en la explotación intensiva de *Pinus radiata*, *Pinus pinaster* y *Eucalyptus globulus* (DGCN, 2000). Este tipo de plantaciones se realiza en rotaciones de entre 12 y 35 años y durante su aprovechamiento se produce una importante extracción de nutrientes del sistema (en Kg ha<sup>-1</sup>, 299 de N, 69 de P, 251 de K, 112 de Ca y 70 de Mg) (Merino *et al.*, 2003a). Este hecho, unido a la práctica de silviculturas intensivas y la ausencia de fertilizaciones, provoca la extracción de gran cantidad de elementos y en un empeoramiento del estado nutricional del arbolado, especialmente en elementos como P, Mg y Ca (Brañas *et al.*, 2001; Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2002; Zás y Serrada, 2003). La práctica más habitual de fertilización consiste en la aplicación en hoyo de 150-200 g de fertilizante NPK en el momento de establecimiento de la plantación. Sin embargo, diferentes estudios muestran que sus efectos son temporales y no son suficientes para compensar la extracción de nutrientes durante la explotación maderera (Merino *et al.*, 2003b). Estos mismos autores señalan la necesidad de mejorar las condiciones de estas masas a través de la gestión de restos de corta y de fertilizaciones. Una alternativa para corregir la acidez y los deficientes niveles de nutrientes en los suelos y vegetación podría ser la aplicación de cenizas de biomasa, práctica que ha mostrado resultados muy satisfactorios en otros países (Ferm *et al.*, 1992; Arvidsson y Lundkvist, 2002). En las condiciones de Galicia se ha realizado un ensayo previo de laboratorio que reveló mejoras substanciales de los efectos encalantes y fertilizantes de

estas cenizas, así como aumentos en la producción vegetal (Solla-Gullón *et al.*, 2002). El trabajo también puso de manifiesto la inexistencia de concentraciones preocupantes de metales pesados ni de nitratos en las aguas.

El estado nutricional de una planta es un parámetro crucial para conocer la calidad de la misma y esencial a la hora de plantearse posibles actuaciones de corrección de nutrientes. A menudo es estudiado, tanto en masas forestales como en cultivos agrícolas y hortícolas, para identificar y corregir las posibles deficiencias o excesos de nutrientes. Hasta la actualidad se han desarrollado varios métodos que evalúan el estado nutricional de las plantas como el método de niveles críticos, técnicas basadas en equilibrios nutricionales, sistema DRIS y el análisis de vectores (Timmer y Stone, 1978). Todos estos métodos difieren en su sensibilidad y utilidad, pero el análisis de vectores es una herramienta que enlaza el estado de nutrientes y el crecimiento de la planta como respuesta a un determinado tratamiento, ya sea experimental o de manejo.

El objetivo principal del presente trabajo es la valoración del estado nutricional de una plantación de *Pinus radiata* sometida a la aplicación de cenizas de biomasa arbórea y su comparación con la ausencia de fertilización y el aporte de fertilizante mineral NPK (8:24:16).

## Material y Métodos

### Sitio de estudio

La experiencia de campo fue establecida en una plantación forestal de *Pinus radiata* situada a 495 metros de altitud en la parroquia de Bravos, Outeiro de Rei, Lugo (43° 03' 37,1'' N, 7° 41' 44,6'' W). La precipitación media anual es de 1277 mm y las temperaturas medias mínimas y máximas (2,1 y 21,4 °C) corresponden a los meses de enero y de julio, respectivamente. El suelo presenta una profundidad media de 75 cm y se desarrolla sobre granitos de dos micas correspondiendo a un regosol úmbrico, con un único horizonte A de tipo úmbrico (FAO-UNESCO, 1998). El horizonte superficial del suelo se caracteriza por su bajo valor de pH (4,4), alto contenido en materia orgánica (9,7%), textura gruesa y desaturación en bases. El terreno a plantar estaba ocupado por matorral de más de 2 metros de altura y cobertura total

de especies leguminosas (*Ulex europaeus*, *Cytisus scoparius*, *Pterospartum tridentatum*) y ericáceas (*Erica australis*). En mayo de 2000 se realizó un desbroce total por trituración y los restos se incorporaron al suelo por pase de grada pesada.

### Diseño experimental

El experimento se basó en un diseño totalmente aleatorizado con cuatro tratamientos y cuatro réplicas. Cada réplica se practicó en una parcela de 24 × 24 metros y los tratamientos consistieron en un control, dos dosis de cenizas en cobertura (5.000 kg ha<sup>-1</sup> y 10.000 kg ha<sup>-1</sup>) y una dosis de 200 gramos de fertilizante mineral NPK, tipo abono complejo 8:24:16, de liberación rápida (Fertiberia S.A.) en hoyo que es la cantidad empleada normalmente en repoblaciones de la zona. Las cenizas se añadieron en mayo de 2000, justo después de la preparación mecánica, mientras que el abonado con NPK se realizó en octubre de 2000.

Para conseguir una aplicación uniforme de las cenizas se dividió cada parcela en subparcelas de 6 × 6 m donde se distribuyeron de forma manual las cantidades correspondientes. Con el fin de facilitar la incorporación de las cenizas al suelo, después de la aplicación de éstas se aplicó un segundo pase de grada pesada con una profundidad de 25 cm. Finalmente, una semana después de la aplicación de las cenizas, se plantó con *Pinus radiata* de 1 savia a raíz desnuda a un marco de plantación de 2 × 3.

Las cenizas aplicadas en este ensayo procedieron de la planta de tablero aglomerado que el Grupo empresarial Tablicia - Interpanel posee en Nadela (Lugo) y que consistían principalmente en restos de combustión de la corteza de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*. Su composición aparece en la Tabla 1. Las dosis de 5.000 kg ha<sup>-1</sup> y 10.000 kg ha<sup>-1</sup> contienen, respectivamente, 13 y 26 kg P ha<sup>-1</sup>; 55,5 y 111 kg K ha<sup>-1</sup>; 125 y 250 kg Ca ha<sup>-1</sup> y 30 y 60 kg Mg ha<sup>-1</sup>. Las cenizas aplicadas constaban tanto de material fino extraído del horno de aspiración como de muestras gruesas de la base del horno.

### Toma de muestras y mediciones

El estudio abarcó el periodo comprendido entre junio de 2000 y octubre de 2002. Inicialmente, la toma de muestras de suelo se realizó de manera mensual has-

**Tabla 1.** Composición química de las cenizas utilizadas (Merino *et al.*, 2000)

	Totales	Asimilables <sup>1</sup>
Humedad (%)	11,5	
Gruesos (> 4 mm) (%)	11,3	
pH (H <sub>2</sub> O)	10,4	
pH (KCl)	10,9	
Materia orgánica (%)	56,1	
C (g kg <sup>-1</sup> )	505,1	
N (g kg <sup>-1</sup> )	5,56	
S (g kg <sup>-1</sup> )	0,32	
P (g kg <sup>-1</sup> )	2,6	0,4 (15%)
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	25,0	13,8 (55%)
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	6,0	1,5 (25%)
Na (g kg <sup>-1</sup> )	2,4	1,2 (50%)
K (g kg <sup>-1</sup> )	11,1	5,0 (45%)
Al (g kg <sup>-1</sup> )	16,2	n.d
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	1,8	1,1 (59%)
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	23,7	3,7 (15%)
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	32,9	4,5 (14%)
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	1.391,0	380,0 (27%)
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	1.472,0	353,9 (24%)
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	14,0	8,1 (58%)
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	47,0	14,0 (30%)
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	1.704,0	44,0 (26%)

<sup>1</sup> En paréntesis se muestra el porcentaje de elemento asimilable con respecto a la cantidad total de ese elemento.

ta noviembre de 2000 con el fin de conocer cómo evolucionan los diferentes parámetros del suelo a corto plazo. A partir de esta fecha, la toma de muestras de suelo fue estacional. De cada parcela se tomó, con una sonda y en 4 puntos diferentes, una muestra del horizonte superficial (0-20 cm). Todas estas muestras de una misma parcela se mezclaron y homogeneizaron para obtener una muestra de cada parcela.

Los muestreos de las acículas se realizaron en cuatro épocas diferentes, otoño (octubre de 2001), invierno (enero de 2002), primavera (abril de 2002), verano (julio de 2002) y otoño del segundo año (octubre de 2002). La muestra foliar de cada parcela estaba compuesta por submuestras de acículas tomadas en, al menos, 40 individuos de la parte central de la misma. Las acículas se tomaron del tercio superior de la planta, en la zona soleada y del crecimiento del año.

### Análisis químicos

Las muestras de suelo se secaron a 40 °C y se tamizaron por 2 mm. Las acículas se secaron a 65 °C y se

molieron hasta 0,25 mm. En ambos tipos de muestras se analizaron los macro y micronutrientes siguientes: C, S, N, P, Ca, Mg, K, Mn, Fe, Cu, Ni y Zn.

Las concentraciones de C, S y N totales en suelos y acículas se determinaron por combustión en un auto-analizador CNS 2000 (LECO, St Joseph, Michigan, EE UU). En los suelos, la determinación del pH en H<sub>2</sub>O y KCl 0,1 N se realizó con electrodo de vidrio, empleando una relación suelo:disolución de 1:2,5. Los elementos asimilables (P, Ca, Mg, K, Mn, Fe, Cu, Ni y Zn) se extrajeron con reactivo Mehlich 3 (Mehlich, 1984) y se analizaron en un equipo ICP-OES (Perkin Elmer, Wellesley, MA, EE UU).

En las muestras foliares los elementos se determinaron después de realizar una digestión de las muestras molidas 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 (Jones *et al.*, 1991) y se analizaron mediante un equipo ICP-OES, usando hojas de *Robinia pseudoacacia* como material certificado de referencia.

### Evolución del estado nutricional de la masa

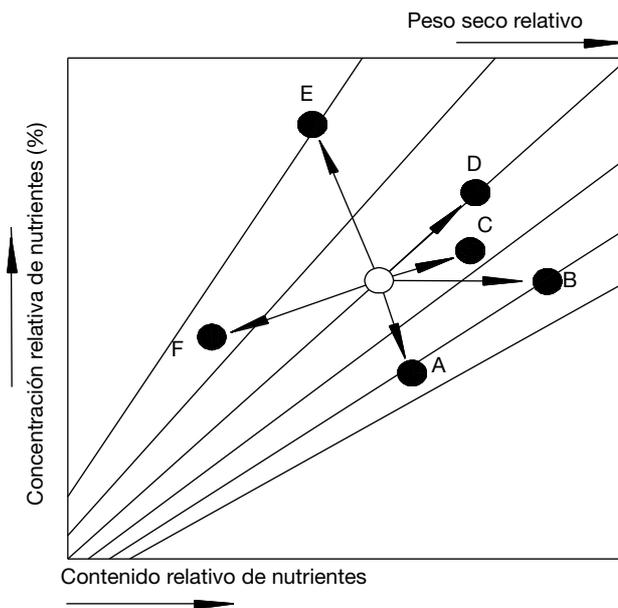
El estado nutricional de la masa se evaluó en base a dos criterios. El primero de ellos se basó en el método de niveles críticos (Will, 1985). Esta técnica compara las concentraciones foliares con unos niveles críticos definidos como la concentración a la cual la especie produce el 90% de su máximo (Needham *et al.*, 1990). Igualmente se compararon con los niveles medios observados para esta especie en Galicia por Sánchez-Rodríguez (2002) y Zás y Serrada (2003). Los valores de referencia de estos autores se han recogido en la Tabla 2.

El segundo criterio que se utilizó fue la técnica gráfica propuesta por Timmer y Stone (1978) conocida como análisis de vectores. El peso seco de cada acícula se estimó a partir del peso de 100 acículas representativas. En este método se representa la concentración de cada nutriente, su contenido y el peso seco de sus acículas en un entorno gráfico para evaluar cualitativamente el estado nutricional de la masa. Este método puede ser usado en el diagnóstico de deficiencias nutricionales, consumos de lujo, toxicidades o diluciones de nutrientes foliares por la producción de biomasa. En este trabajo, el peso medio de 100 acículas y los valores de concentración y contenido de nutrientes se han expresado en un diagrama de vectores (Figura 1), en el cual los valores del tratamiento control se han usado como la referencia contra la que se representa los valores del resto de las parcelas fertili-

**Tabla 2.** Valores óptimos de referencia y concentraciones foliares en plantaciones de *Pinus radiata* de Galicia

	Óptimo <sup>1</sup>	Jóvenes <sup>2</sup>	Adultas <sup>3</sup>
N (mg g <sup>-1</sup> )	12,0-15,0	16,9	16,0
P (mg g <sup>-1</sup> )	1,2-1,4	1,1	0,9
S (mg g <sup>-1</sup> )			
K (mg g <sup>-1</sup> )	3-5	6,2	5,7
Ca (mg g <sup>-1</sup> )	1,0	2,1	1,5
Mg (mg g <sup>-1</sup> )	0,7-1,0	0,8	0,8
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )		71,3	47,6
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		189,2	237,2
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )		8,4	4,9
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )		30,1	18,7
N/P		21,5	

<sup>1</sup> Will (1985). <sup>2</sup> Zás y Serrada (2003). Valores medios de 13 plantaciones jóvenes sobre rocas graníticas. <sup>3</sup> Sánchez-Rodríguez *et al.* (2002). Valores medios de 9 plantaciones sobre rocas graníticas.



Desplazamiento	Respuesta en...			Interpretación	Posible diagnóstico
	Peso unitario	Nutrientes			
		Conc.	Contenido		
A	+	-	+	Dilución	No limitante
B	+	0	+	Suficiente	No limitante
C	+	+	+	Deficiente	Limitante
D	0	+	+	Consumo de lujo	No tóxico
E	-	++	±	Exceso	Tóxico
F	-	-	-	Exceso	Antagónico

**Figura 1.** Interpretaciones de los desplazamientos de los vectores en la concentración y contenido de nutrientes y peso unitario. +: aumento. -: disminución. ±: aumento o disminución. 0: no varía. Adaptado de Timmer y Stone (1978).

zadas (Weetman, 1989; Timmer, 1991). Se realizaron los análisis de vectores para todas las fechas de muestreo de acículas. Aunque la interpretación de algún elemento no es igual para todos los meses, se muestra el caso más representativo (abril de 2002).

## Análisis de datos

El análisis de la respuesta de la fracción sólida del suelo y de las acículas a la fertilización se llevó a cabo a través de un análisis de medidas repetidas utilizando el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS System v.8.02 (SAS Institute, 1999). El modelo matemático utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + D_j + T_i * D_j + \varepsilon_{ij}$$

donde  $Y_{ij}$  es la variable aleatoria que representa el valor de la respuesta en la  $j$ -ésima observación del  $i$ -ésimo tratamiento;  $\mu$  es una constante que representa la respuesta media de la variable  $Y$ ;  $T_i$  y  $D_j$  son los efectos del tratamiento  $i$  ( $i = 0, 1, 2$  y  $3$ ) y del tiempo  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, 13$ ), respectivamente;  $T_i * D_j$  es el efecto de la interacción del tratamiento  $i \times$  el tiempo  $j$  y  $\varepsilon_{ij}$  es el error experimental.

Se realizaron análisis de varianza considerando cada fecha de muestreo de modo independiente únicamente cuando el efecto tratamiento del modelo anterior fue significativo. El método de comparaciones múltiples usado para la clasificación de las medias fue el de Tukey.

Con el análisis de contrastes se evaluó el desarrollo temporal del ensayo comparando la primera medida ( $t_0$  para la fracción sólida y  $t_{16}$  para las acículas) con todas las posteriores. Para ello se debió asignar un peso determinado a cada uno de los muestreos según el contraste que se pretendió realizar, de tal modo, que la suma de todos ellos fuese cero.

Con el procedimiento CORR, se han efectuado análisis de correlaciones simples mediante el cálculo del coeficiente de Pearson, para verificar la posible relación entre las concentraciones de elementos de la fracción sólida del suelo y las acículas (SAS Institute, 1999).

## Resultados

### Acidez del suelo

El suelo sin tratar presentó unos valores de pH en H<sub>2</sub>O iniciales (junio de 2000) en torno a 4,4, lo que

puede considerarse como ácido (Figura 2a). El aporte de cenizas supuso aumentos iniciales de 0,4 y 0,6 unidades tras la aplicación de 5.000 y 10.000 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A lo largo del periodo de estudio la diferencia máxima se produjo en la primavera de 2001, alcanzando las 0,7 unidades y, a partir de ese momento, se redujo paulatinamente. Puesto que la aplicación del fertilizante NPK fue localizada, ésta no produjo ninguna alteración en el pH del suelo. El ANOVA de medidas repetidas reveló diferencias significativas de este parámetro atribuible al aporte de cenizas (Tabla 3).

### N total en suelo y acículas

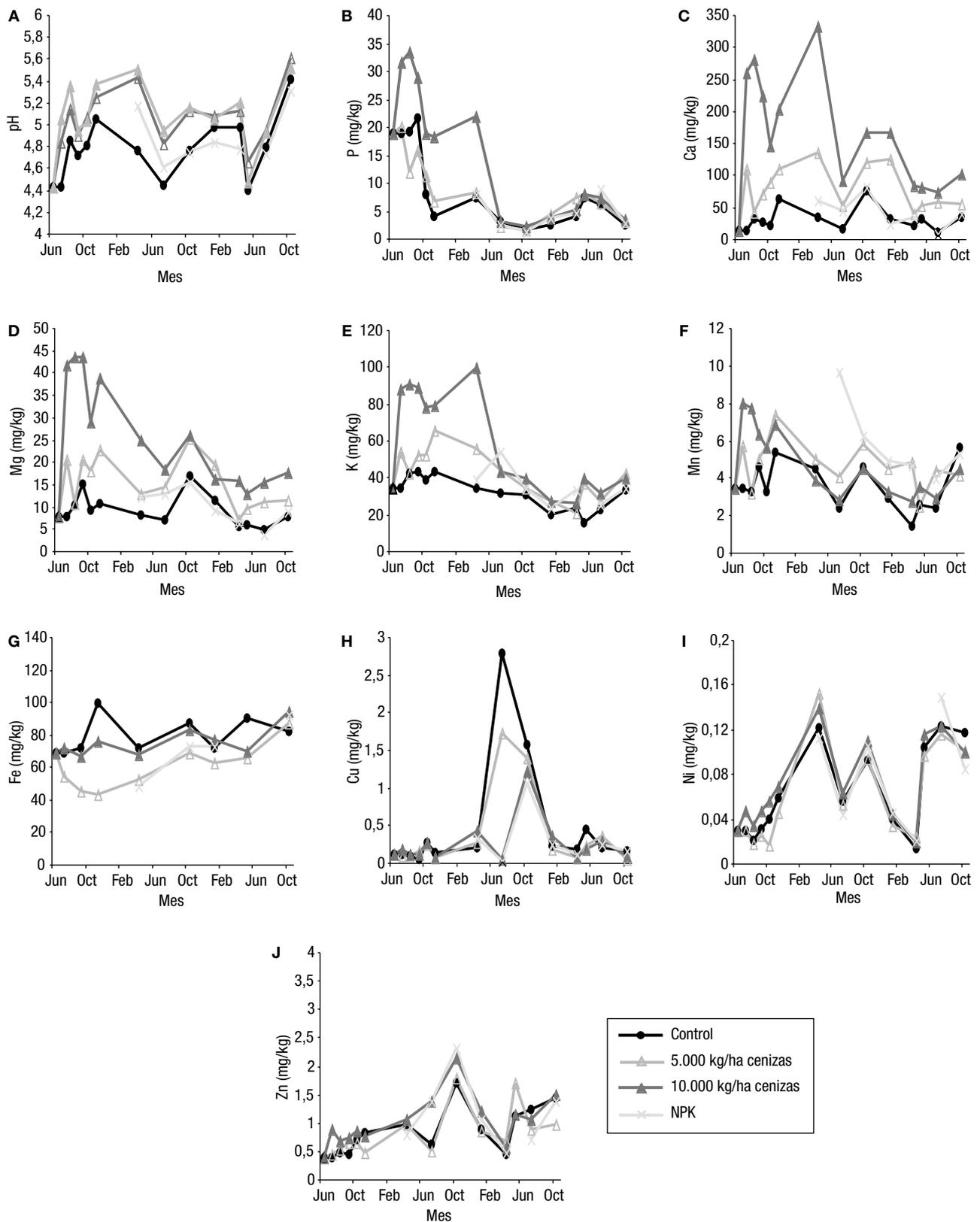
En las parcelas control se observó un contenido inicial de N total en el suelo en torno al 0,30 %. Los aportes de cenizas no derivaron en modificaciones significativas de este parámetro.

Respecto a los niveles foliares (Figura 3a), las parcelas control presentaron niveles comprendidos entre 1,6 y 2,2%, lo que se considera satisfactorio para esta especie (Will, 1985). Las fertilizaciones con cenizas o NPK no produjeron diferencias significativas, incluso se observó un ligero descenso tras el aporte de cenizas. El análisis de vectores muestra que las concentraciones foliares de N son suficientes en todas las parcelas (Figura 4a).

### S total en suelo y acículas

El S total del suelo siguió una tendencia similar a la del N, sin que se apreciaran diferencias significativas atribuibles a los tratamientos. Tampoco existieron diferencias significativas en las concentraciones foliares de este elemento. El análisis de vectores muestra un comportamiento similar al del N (no mostrado).

Los niveles críticos de S foliar fueron determinados a través de su relación óptima con los niveles de N. Kelly y Lambert (1972) propusieron como óptimo en la relación N/S para *Pinus radiata* un valor de 14,7. En las parcelas de ensayo se obtuvieron relaciones superiores a este valor en todos los tratamientos durante los primeros 3 muestreos (octubre 2001 y enero y abril 2002). A partir de julio de 2002 los valores obtenidos en todos los casos se situaron muy próximos al óptimo.



**Figura 2.** Evolución del pH y de las concentraciones de P, Ca, Mg y K disponible en la fracción sólida del suelo, para los distintos tratamientos considerados.

**Tabla 3.** Cuadro resumen de los análisis estadísticos realizados para los parámetros y elementos químicos analizados en la fracción sólida del suelo

Variable	Grupo	A: ANOVA independiente y contrastes estimados															B: ANOVA medidas repetidas			
		t <sub>0</sub>	t <sub>0</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>10</sub>	t <sub>13</sub>	t <sub>16</sub>	t <sub>19</sub>	t <sub>22</sub>	t <sub>23</sub>	t <sub>25</sub>	t <sub>28</sub>	t <sub>0</sub>	Inter	Intra	
		vs. all														vs. t <sub>28</sub>	X		X* trat	
pH	C	**		a	a				a	a	ab	ab					***	**	***	
	D5	***		b	ab				b	b	ab	b					***			
	D10	***		b	b				b	b	b	ab					***			
	M	**							ab	a	a	a					***			
P	C	***			ab			a	ab									*	***	**
	D5	***			a			a	ab											
	D10	***			b			b	b											
	M	***							a											
Ca	C				a		a		a	a	a	a			a		***	***	***	
	D5	**			a		ab		ab	b	a	ab			ab					
	D10	***			b		b		b	ab	b	b			b					
	M	**							a	b	a	a			a					
Mg	C			a	a		a	a	a			a			a		**	***	***	
	D5			ab	a		ab	ab	ab	b		a			ab					
	D10	**		b	b		b	b	b	b		b			b					
	M								ab	ab		a			a					
K	C			a	a		a		a								**	***	*	
	D5			ab	a		ab		ab											
	D10			b	b		b		b											
	M								ab											

A: comparaciones independientes entre tratamientos C, 5, 10 y M (control, 5 Mg ha<sup>-1</sup> de cenizas, 10 Mg ha<sup>-1</sup> de cenizas y fertilizante mineral NPK 8:24:16, respectivamente) para cada muestreo t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, t<sub>3</sub>, t<sub>4</sub>, t<sub>5</sub>, t<sub>10</sub>, t<sub>13</sub>, t<sub>16</sub>, t<sub>19</sub>, t<sub>22</sub>, t<sub>23</sub>, t<sub>25</sub> y t<sub>28</sub> utilizando ANOVA. \*\*\* P ≤ 0,001. \*\* 0,001 < P ≤ 0,01. \* 0,01 < P ≤ 0,05. □: C = D5 = D10 = M, b > a [F(p) > 0,05]. En los primeros 5 muestreos, comparaciones entre C, D5 y D10. A partir del t<sub>10</sub>, comparaciones entre todos los tratamientos. B: ANOVA de medidas repetidas. Los efectos «inter-tratamientos» estimaron las diferencias entre los distintos tratamientos a lo largo del tiempo. Los efectos «intra-tratamientos» estimaron los efectos globales del tiempo y los efectos de interacción tiempo × tratamiento donde el F-value fue ajustado con la Epsilon de Huynh-Feldt.

### P disponible en suelo y acículas

Los niveles de P disponible en las parcelas sin tratar fueron bajos (entre 21 y 1,4 mg kg<sup>-1</sup>). El aporte de la dosis de 10.000 kg ha<sup>-1</sup> de cenizas derivó en incrementos significativos en este elemento (Figura 2b, Tabla 3). En todas las parcelas, los niveles de P disponible disminuyeron progresivamente hasta estabilizarse en valores inferiores a 5 mg kg<sup>-1</sup> y, a partir de julio 2001, las diferencias entre tratamientos no resultaron significativas.

El tratamiento control presentó valores iniciales de P foliar de 1,6 mg g<sup>-1</sup>, que pueden considerarse como óptimos (Will, 1985). No se observaron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 3c, Tabla 4).

### Ca disponible en suelo y acículas

Los valores de Ca disponible en el suelo sin tratar fueron muy bajos, siempre por debajo de 75 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 2c). La aplicación de cenizas aumentó significativamente los niveles disponibles de este elemento en el suelo, llegando a alcanzar valores superiores a 300 mg kg<sup>-1</sup> durante los primeros meses después de la aplicación de los tratamientos. Al cabo del tiempo, y, especialmente, a partir de la primavera de 2002, las diferencias entre tratamientos se redujeron aunque siguieron siendo estadísticamente significativas (Tabla 3). Como era de esperar, el aporte de fertilizante mineral NPK no modificó los niveles disponibles de este elemento en el suelo.

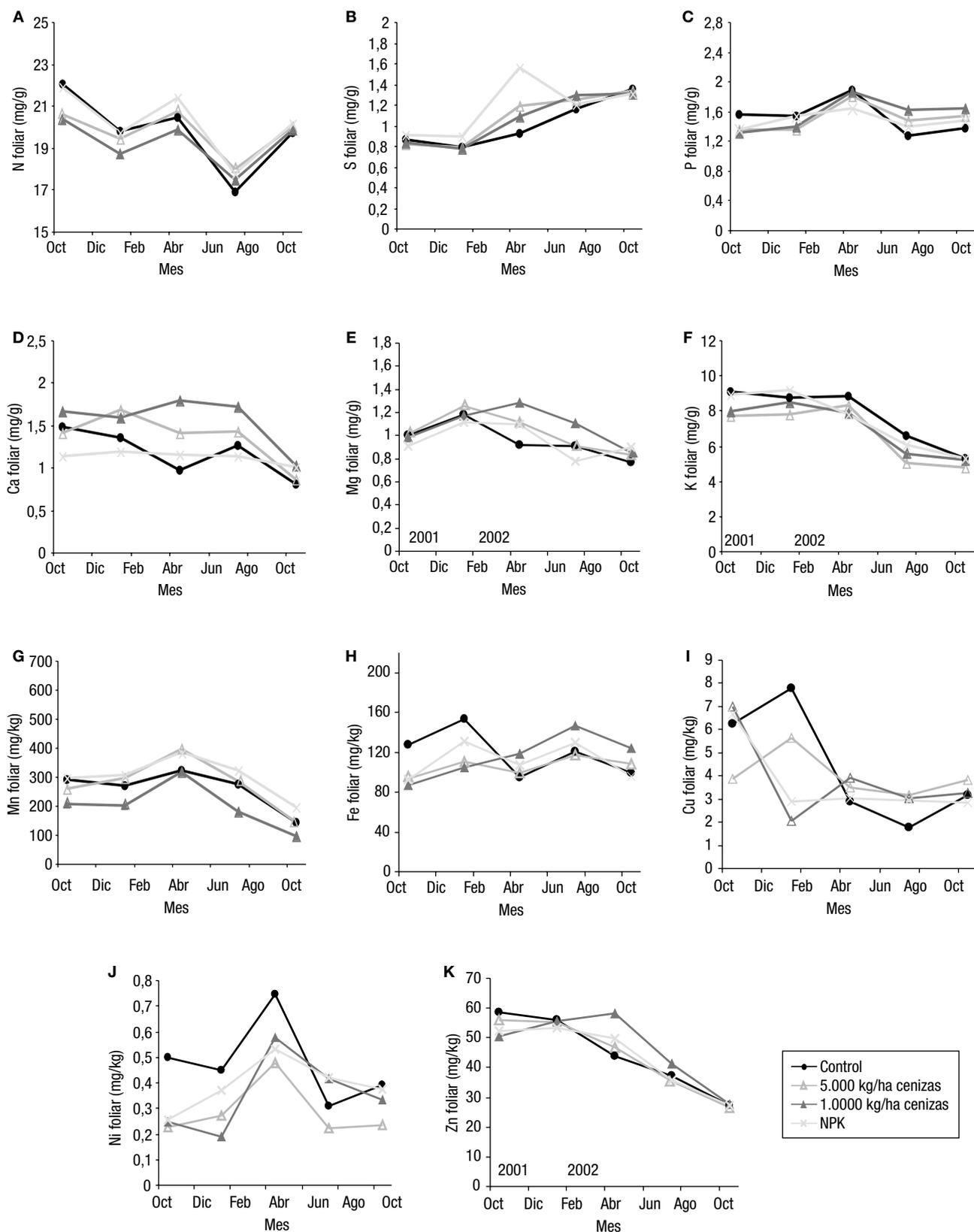
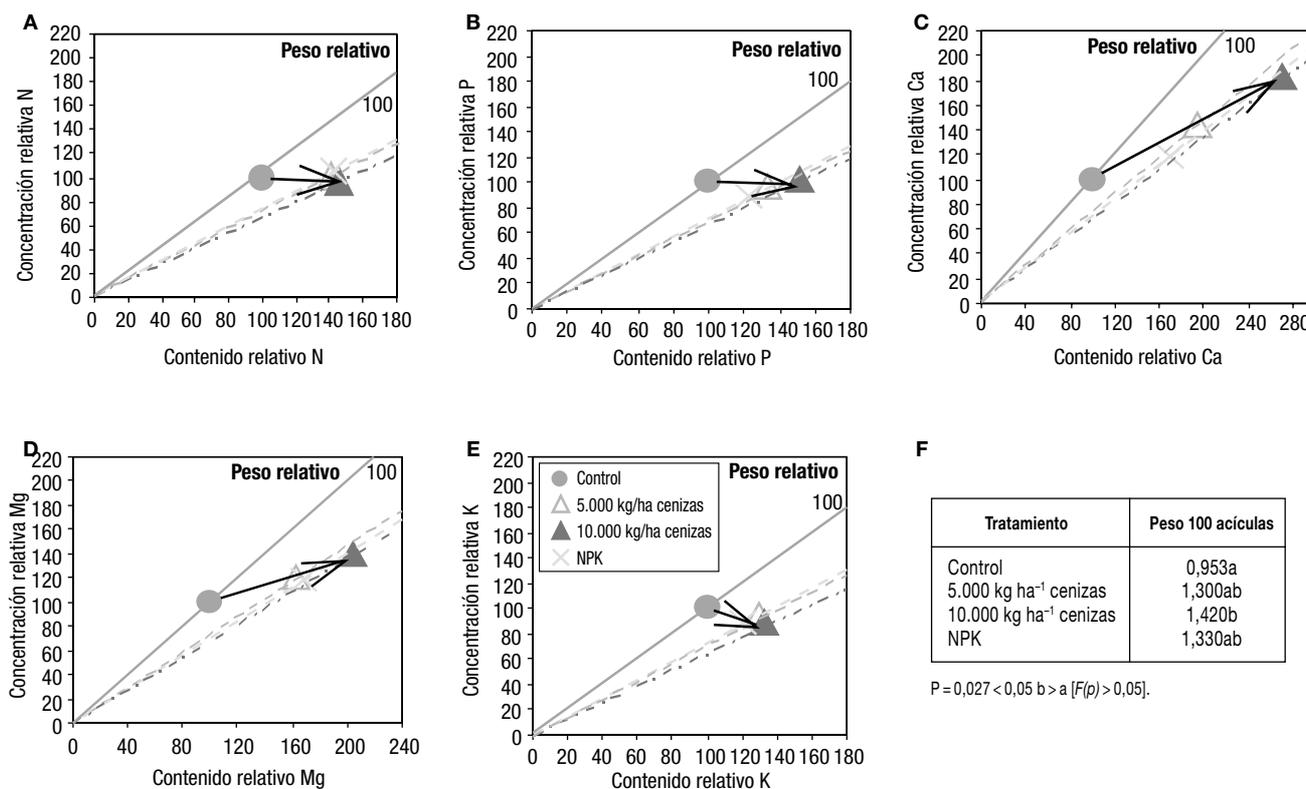


Figura 3. Evolución de Mn, Fe, Cu, Ni y Zn Foliar en los distintos tratamientos.



**Figura 4.** Gráficas de vectores para los análisis foliares realizados y peso medio de 100 acículas en abril de 2002. Se muestran los resultados del muestreo más representativo de la respuesta.

Las concentraciones foliares iniciales en las parcelas sin tratar fueron de 1,4 mg g<sup>-1</sup> (Figura 3d), que puede considerarse como suficiente para este especie (Will, 1985). El aporte de cenizas produjo incrementos significativos durante casi todo el período de estudio (Tabla 4). Las diferencias se redujeron mucho durante el último mes de muestreo, lo que coincide con la evolución de Ca en el suelo. El análisis de vectores (Figura 4c) indica que las concentraciones de este elemento en el suelo son limitantes para el crecimiento. En relación a esto se puede señalar también la relación significativa encontrada en los niveles de suelo y acículas (r = 0.41, p < 0.001).

### Magnesio disponible en el suelo y acículas

El Mg en el suelo siguió una evolución similar a la del Ca (Figura 2d), presentando el suelo sin tratar unos valores iniciales inferiores a 10 mg kg<sup>-1</sup> considerados muy bajos. El aporte de cenizas en su dosis alta corrigió la disponibilidad de este elemento en el suelo hasta alcanzar un valor de 45 mg kg<sup>-1</sup> con efectos signifi-

cativos del tratamiento. En cuanto a los niveles foliares, el tratamiento control presentó concentraciones de Mg inferiores a 1 mg g<sup>-1</sup> (Figura 3e). Los tratamientos con cenizas presentaron mayores concentraciones de este elemento, alcanzando valores máximos de 1,4 mg g<sup>-1</sup>, aunque la respuesta no fue homogénea a lo largo del período de estudio. Al igual que ocurría con el Ca, el análisis de vectores muestra, como posible diagnóstico, una limitación para este elemento (Figura 4d). Igualmente, se puede señalar la relación significativa entre los niveles foliares con los del suelo (r = 0.39, p < 0.001).

### Potasio disponible en el suelo y acículas

Los niveles de K disponible presentaron unas concentraciones iniciales en las parcelas control próximas a 30 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 2e). El aporte de 5 y 10 t ha<sup>-1</sup> de cenizas produjeron incrementos iniciales de hasta 22 y 65 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente con efecto significativo entre tratamientos. Sin embargo, a medida que transcurrió el tiempo, y al igual que ocurrió con otros

**Tabla 4.** Cuadro resumen de los análisis estadísticos realizados para los elementos químicos analizados en las acículas de *Pinus radiata*

Variable	Grupo	A: ANOVA independiente y contrastes estimados						B: ANOVA medidas repetidas			
		$t_{16}$ vs. all	$t_{16}$	$t_{19}$	$t_{22}$	$t_{25}$	$t_{28}$	$t_{16}$ vs. $t_{28}$	Inter	Intra	
										X	X*trat
N	C	**						*		***	
	D5										
	D10										
	M										
P	C									***	
	D5										
	D10										
	M										
Ca	C		ab	ab	ab	ab			***	***	*
	D5		ab	b	ab	ab		*			
	D10		b	ab	b	b		***			
	M		a	a	a	a					
Mg	C									***	
	D5							*			
	D10										
	M										
K	C	*						***		***	
	D5							**			
	D10	*						**			
	M	*						***			

A: comparaciones independientes entre tratamientos C, 5, 10 y M (control, 5 Mg ha<sup>-1</sup> de cenizas, 10 Mg ha<sup>-1</sup> de cenizas y fertilizante mineral NPK 8:24:16, respectivamente) para cada muestreo  $t_{16}$ ,  $t_{19}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{25}$  y  $t_{28}$  utilizando ANOVA. \*\*\*  $P \leq 0,001$ . \*\*  $0,001 < P \leq 0,01$ . \*  $0,01 < P \leq 0,05$ . □: C = D5 = D10 = M, b > a [ $F(p) > 0,05$ ]. B: ANOVA de medidas repetidas. Los efectos «intra-tratamientos» estimaron los efectos globales del tiempo y los efectos cruzados globales de tiempo × tratamiento donde el F-value fue ajustado con la Epsilon de Huynh-Feldt.

elementos, las diferencias entre tratamientos disminuyeron. Todos los tratamientos presentaron niveles de K foliares satisfactorios (Figura 3f), superiores a 5 mg g<sup>-1</sup> (Will, 1985). Se puede señalar, que a partir de abril 2002 todos los tratamientos presentaron un descenso de los niveles foliares, que no se correspondió con la evolución de las concentraciones en el suelo. A pesar de los cambios en los suelos, los aportes de cenizas o de NPK no derivaron en incrementos de este elemento en las acículas, sino que todo lo contrario, hubo una tendencia a disminuir aunque no significativa. Coincidiendo con esto, el análisis de vectores muestra un ligero efecto de dilución de este elemento provocado por un mayor crecimiento (Figura 4e).

### Mn, Fe, Cu, Ni y Zn disponibles en el suelo y acículas

Los aportes de cenizas no derivaron en variaciones significativas de los niveles disponibles de ninguno de estos elementos (Figuras 2 f-j). En cuanto a las concentraciones foliares, las únicas alteraciones fueron los menores niveles de Mn y Ni en las parcelas que recibieron cenizas (Figuras 3 g-k).

### Discusión

Los resultados mostraron que los aportes de cenizas de biomasa produjeron aumentos temporales en los

valores de pH del suelo (entre 0,4 y 1 unidad), lo que se atribuye a su carácter alcalino por la gran cantidad de óxidos y carbonatos de Ca, Mg y K que presentan (Lerner y Utzinger, 1986; Campbell, 1990; Clapham y Zibilske, 1992; Ferm *et al.*, 1992; Vance, 1996; Saarsalmi *et al.*, 2001; Solla-Gullón *et al.*, 2002).

A pesar de la heterogénea granulometría del material empleado, que incluye tanto partículas volátiles como de tamaño superior a 2 cm, la reacción que produjo en el suelo fue temporal y se limitó a los 18 primeros meses. Algunos estudios han mostrado que las cenizas reaccionan más rápidamente en el suelo que la caliza agrícola. En este sentido, se observan mayores incrementos iniciales de pH que se mantienen por un menor periodo de tiempo (Clapham y Zibilske, 1992; Muse y Mitchell, 1995). Por el contrario, existen estudios en los que se constatan incrementos de pH prolongados, de hasta 40 años (Naylor y Schmidt, 1989; Silfverberg y Hotanen, 1989; Muse y Mitchell, 1995). Un factor importante que afecta a la velocidad de reacción de ambos, caliza agrícola y cenizas de madera, es el tamaño de partícula, de tal modo que los productos granulados son menos reactivos en el suelo que en forma de polvo (Clarholm, 1994).

Los contenidos de N en suelo y acículas son elevados, lo que se corresponde con observados en Galicia para plantaciones *Pinus radiata*. La adición de NPK no condujo a alteraciones en la concentración de N, posiblemente porque los niveles en acículas eran suficientes. Dada el escaso contenido de N en estas cenizas, los tratamientos no derivaron en variaciones de las concentraciones de N foliar. Por el contrario, se observó un ligero descenso del N foliar tras estos tratamientos, lo que puede estar provocado por dos posibles causas: es posible que se produjera un proceso de inmovilización microbiana de N (Haynes, 1986) como consecuencia de la elevada relación C orgánico / N orgánico de las cenizas o bien a un ligero efecto de dilución como parece indicar el análisis de vectores (Figura 4a).

Las respuestas más importantes que se producen como consecuencia del aporte de cenizas fueron los incrementos de P, K, Ca, y Mg en el suelo y de Ca y, en menor medida, Mg en las acículas. Estos resultados en el suelo coinciden con los de otros trabajos (Fritze y Smolander, 1994; Kahl y Fernández, 1996; Haimi *et al.*, 2000; Levula *et al.*, 1999). El incremento de las concentraciones foliares de estos elementos también han sido observada en otros estudios (Moilanen *et al.*, 2002; Arvidsson y Lundkvist, 2002). Estos efectos pueden considerarse como beneficiosos para la sostenibilidad

de las masas de *Pinus radiata* puesto son los elementos que en mayor medida limitan el crecimiento de esta especie en Galicia (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2002). En el suelo, este efecto se apreció desde el momento de la aplicación de las cenizas y se perdió al cabo de 24 meses, mientras que en las acículas, los efectos comenzaron a apreciarse a los 18 meses (para Ca) y a los 24 meses (para Mg) perdiéndose a los 28 meses.

Las concentraciones foliares de P fueron claramente superiores a las observados en Galicia para esta especie por Zás y Serrada (2003), en rodales jóvenes y Sánchez-Rodríguez (2002), en masas adultas. La relación N/P foliar en todos los casos aparece equilibrada y comprendida entre 9 y 15. Estos valores son considerados como normales para esta especie (6-16) (Rau-pach, 1967), aunque se trata de valores menores a los observados por Sánchez-Rodríguez *et al.*, (2002). La incorporación de los restos de matorral desbrozado incrementó los contenidos disponibles de este elemento en el suelo. Es posible que estas concentraciones anormalmente elevadas para esta especie en la región se deban a este tipo de preparación del terreno, en el que se incorporó gran cantidad de residuo vegetal moderadamente lignificado. El incremento de P disponible en el suelo no fue proporcional con las dosis de cenizas. Esto puede ser debido a que en la disponibilidad de este elemento intervienen tanto la cantidad que se aporta como el incremento de pH, y, este último, fue algo mayor en el tratamiento con 10.000 kg ha<sup>-1</sup> de cenizas.

Los incrementos de K, Ca y Mg disponibles en el suelo que se produjeron tras el aporte de las cenizas disminuyeron rápidamente con el tiempo. En el caso del K este efecto se debe posiblemente a su gran solubilidad, que hace que se pierda por lavado (Fisher y Binkley, 2000; Ouro *et al.*, 2001). En otros trabajos en Galicia y norte de España igualmente se han observado niveles foliares óptimos para K (Romanya y Vallejo, 1996; Mesanza *et al.*, 1993). A pesar de la respuesta positiva observada en el suelo, no se apreciaron incrementos de K foliar, aspecto que también ha sido observado por McDonald *et al.* (1994). La falta de respuesta en el presente estudio se debe al efecto de dilución de este elemento que se produce como consecuencia del mayor crecimiento de la masa (Figura 4-f).

En el caso de Ca y Mg, elementos que muestran menor movilidad, su lavado pudo verse acelerado como consecuencia de la textura arenosa del suelo.

A pesar de que el procedimiento de preparación seguido fue favorable para la nutrición de la plantación durante los primeros años, se obtuvieron diferencias sig-

nificativas con la aplicación de cenizas, particularmente en Ca y Mg. Después de P, Mg y Ca son los elementos más limitantes para *Pinus radiata* en Galicia. Los análisis de vectores muestran una respuesta temporal positiva al incremento de las concentraciones de estos nutrientes en acículas que, unido a un incremento en el peso unitario de acículas, puede indicar una deficiencia de estos nutrientes en las condiciones de estudio. La aplicación de fertilizante NPK no incrementó los niveles de Mg o Ca, aunque éstos se pueden aportar en pequeñas cantidades como impurezas en el fertilizante.

Con respecto a los micronutrientes, las únicas tendencias que se observan son los descensos en las concentraciones foliares de Mn y Ni. Este comportamiento, que ya ha sido descrito en otros trabajos (Huang *et al.*, 1992; Krejzl y Scanlon, 1996), se produce a pesar de las concentraciones moderadas de Mn en las cenizas y puede deberse a la menor disponibilidad de estos elementos como consecuencia del aumento del pH en el suelo.

## Conclusiones

La fuerte acidez de los suelos forestales y la cantidad de nutrientes extraídos durante la explotación forestal pueden ser contrarrestados con la aplicación de cenizas de corteza de madera. Estas cenizas incrementan el valor de pH y las concentraciones de P, K, Ca y Mg, en suelos y hojas, mostrándose el Ca como elemento limitante para la nutrición de plantaciones de *Pinus radiata* en terrenos de matorral de Galicia. El Mg, también mostró una tendencia parecida, aunque no pudo confirmarse estadísticamente. El aporte de cenizas en las dosis empleadas en este tipo de terreno no derivó en incrementos en los niveles de metales pesados en el suelo ni en las acículas.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el marco de un proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional I+D, del Ministerio de Educación y Cultura, y de la Asociación Galega Monte-Industria (AGF99-0604-CO2-01). Los autores agradecen a María Fe López, Elena Fernández y Placeres Conde su colaboración en los trabajos de campo y laboratorio. Los análisis de ICP-OES se realizaron por el personal del FISQUITECNAL de la Universidad de Santiago de Compostela. Especial-

mente, al Sr. Carlos Reija, propietario que cedió la parcela de experimentación.

## Referencias bibliográficas

- ARVIDSSON H., LUNDKVIST H., 2002. Needle chemistry in young Norway spruce stands after application of crushed wood ash. *Plant Soil* 238, 159-174.
- BRAÑAS J., CONDE P., FONTAO M., LÓPEZ M.F., RODRÍGUEZ A., SOLLA-GULLÓN F., MERINO A., VIÑA J., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., SÁNCHEZ F., 2001. Valoración del estado nutricional de repoblaciones forestales de Galicia basada en el análisis foliar y de suelos. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.
- CAMPBELL A.G., 1990. Recycling and disposing of wood ash. *Tappi J* 73, 141-146.
- CLAPHAM W.M., ZIBILSKE L.M., 1992. Wood ash as a liming amendment. *Commun Soil Sci Plant Anal* 23, 1229-1227.
- CLARHOLM M., 1994. Granulated wood ash and a «N-free» fertilizer to forest soil- effects on P availability. *For Ecol Manage* 66, 127-136.
- DGCN, 2000. Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006: Galicia. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid, España.
- ETIÉGNI L., CAMPBELL A. G., 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresour Technol* 37, 173-178.
- FAO-UNESCO, 1998. Clasificación de suelos FAO. Base de Referencia de los Suelos del Mundo. World Reference for Soil Resource. FAO, Roma.
- FERM A., HOKKANEN A., MOILANEN M., ISSAKAINEN J., 1992. Effects of wood bark ash on the growth and nutrition of a Scots pine afforestation in central Finland. *Plant Soil* 147, 305-316.
- FISHER R.F., BINKLEY D., 2000. Ecology and management of forest soils. John Wiley & Sons Inc.
- FRITZE H., SMOLANDER A., 1994. Wood-ash fertilization and fire treatments in a Scots pine forest stand: Effects on the organic layer, microbial biomass and microbial activity. *Biol Fert Soils* 17, 57-63.
- HAIMI J., FRITZE H., MOILANEN P., 2000. Responses of soil decomposer animals to wood-ash fertilization and burning in a coniferous forest stand. *For Ecol Manage* 129, 53-61.
- HAYNES R.J., 1986. Mineral nitrogen in the plant-soil system. *Physiol. Ecol.* Academic Press Inc. London.
- HOLMBERG S., CLAESSE T., 2002. Wood ash-a natural nutrient source for compensation of nutrient deficiency in forest soils caused by acidification. 17<sup>th</sup> WCSS, Tailandia. Paper No. 376.
- HUANG H., CAMPBELL A. G., FOLK R., MAHLER R. L., 1992. Wood ash as a soil additive and liming agent for wheat: field studies. *Commun Soil Sci Plant Anal* 23, 25-33.
- JONES J.B., WOLF B., MILLS H.A., 1991. *Plant Analysis Handbook. A practical Sampling, Preparation, Analysis,*

- and Interpreting Guide. Micro-Macro Publishing, Georgia, EE UU. 213 pp.
- KAHL J.S., FERNÁNDEZ I.J., 1996. Soil processes and chemical transport. *J Environ Qual* 25, 220-227.
- KELLY J., LAMBERT M.J., 1972. The relationship between sulphur and nitrogen in the foliage of *Pinus radiata*. *Plant Soil* 37, 395-407.
- KREJSL J.A., SCANLON T.M., 1996. Evaluation of beneficial use of wood-fired boiler ash on oat and bean growth. *J Environ Qual* 25, 950-954.
- LERNER B.R., UTZINGER J.D., 1986. Wood ash as soil liming material. *Hortscience* 21, 76-78.
- LEVULA T., SAARSALMI A., RANTAVAARA A., 1999. Effects of ash fertilization and prescribed burning on macronutrient, heavy metal, sulphur and <sup>137</sup>Cs concentrations in lingonberries (*Vaccinium vitis-idaea*). *For Ecol Manage* 126, 269-279.
- MCDONALD M.A., HAWKINS B.J., PRESCOTT C.E., KIMMINS J.P., 1994. Growth and foliar nutrition of western cedar fertilized with sewage sludge, pulp sludge, fish silage, and wood ash on northern Vancouver Island. *Can J For Res* 24, 297-301.
- MEHLICH A., 1984. Mehlich N. 3. extractant: a modification of Mehlich No. 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 15, 1409-1416.
- MERINO A., REY C., BRAÑAS J., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., 2003a. Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Invest Agr: Sist Recur For* 12, 85-98.
- MERINO A., RODRÍGUEZ-LÓPEZ J., BRAÑAS R., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., 2003b. Nutrition and growth in newly established plantations of *Eucalyptus globulus* in Northwest Spain. *Ann For Sci (En prensa)*.
- MERINO A., SOLLA-GULLÓN F., NÚÑEZ A., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., 2000. Caracterización de cenizas de corteza de árboles procedentes de industrias de la madera de Galicia. Informe del Dpto. de Edafología y Química Agrícola y Producción Vegetal. Inédito.
- MESANZA J.M., CASADO H., CASTILLO F.J., 1993. Nutrient concentrations in *Pinus radiata* D. Don needles in the Basque Country (Spain): a preliminary classification of parameters and sites. *Ann Sci For* 50, 23-36.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2002. Operaciones de valorización y eliminación de residuos y lista europea de residuos. BOE 043/2002, de 19 de Febrero. Ref. 2002/03285. Pag. 6.494-6.515.
- MOILANEN M., SILVERBERG K., HOKKANEN T.J., 2002. Effects of wood-ash on the tree growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *For Ecol Manage* 171, 321-338.
- MUSE J.K., MITCHELL C.C., 1995. Paper mill boiler ash and lime by-products as soil liming materials. *Agron J* 87, 432-438.
- NAYLOR L.M., SCHMIDT L., 1986. Agricultural use of wood ash as a fertilizer and liming material. *Tappi J* 69, 114-119.
- NCASI, 1999. Forestry environmental program news. National Council of the Paper Industry for air and stream improvement, Inc. (NCASI). Vol. 11 No. 6. USA.
- NEEDHAM T.D., BURGER J.A., ODEWALD R.G., 1990. Relationship between diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) optima and foliar nutrient critical levels. *Soil. Sci Soc Am J* 54, 883-886.
- 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.
- RAUPACH M., 1967. Soil and fertilizer requirements for forest of *Pinus radiata*. *Adv Agron* 19, 307-353.
- ROMANYÁ J., VALLEJO R., 1996. Nutritional status and deficiency diagnosis of *Pinus radiata* plantations in Spain. *For Sci* 42, 192-197.
- SAARSALMI A., MÁLKÖNEN E., PIIRAINEN S., 2001. Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. *Silva Fennica* 35, 355-368.
- SAEFL, 1999. Sustainability Assessment of Swiss Forest Policy. Environmental Documentation, Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL). 195 pp.
- SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ F., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., ESPAÑOL E., LÓPEZ C.A., MERINO A., 2002. Influence of edaphic factors and tree nutritive status on the productivity of *Pinus radiata* D. Don plantations in north-western Spain. *For Ecol Manage* 171, 181-189.
- SAS INSTITUTE, 1999. User's guide, Version 8, 4<sup>th</sup> edition, SAS Institute, Inc. Cary, NC.
- SILVERBERG K., HOTANEN J.P., 1989. Long-term effects of wood ash on a drained mesotrophic *Sphagnum papillosum* in Oulu district. Finland. *Folia For* 742, 1-23.
- SOLLA-GULLÓN F., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., MERINO A., 2002. Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio. *Invest Agr: Prod Prot Veg* 16, 379-393.
- TIMMER V.R., 1991. Interpretation of seedlings analysis and visual symptoms. En: Nutrition and productivity of *Pinus radiata* following harvest disturbance and fertilization of coastal sand dunes (Smith C.T., Dyck W.J., Beets P.N., Hodgkiss P.D., Lowe, A.T., 1994). *For Ecol Manage* 66, 5-38.
- TIMMER V.R., STONE E.L., 1978. Comparative foliar analysis of young balsam fir fertilized with nitrogen, phosphorus, potassium and lime. *Soil Sci Soc Am J* 42, 125-130.
- VANCE E.D., 1996. Land application of wood fired and combination boiler ashes: An overview. *J Environ Qual* 25, 937-944.
- WEETMAN G.F., 1989. Graphical vector analysis technique for testing stand nutritional status. En: Nutrition and productivity of *Pinus radiata* following harvest disturbance and fertilization of coastal sand dunes (Smith C.T., Dyck W.J., Beets P.N., Hodgkiss P.D., Lowe, A.T., 1994). *For Ecol Manage* 66, 5-38.
- WILL G.M., 1985. Nutrient deficiencies and fertilizer user in New Zealand exotic forests. *FRI bulletin* n° 97. Rotorua, Nueva Zelanda. 53 pp.
- ZÁS R., SERRADA R., 2003. Foliar nutrient status and nutritional relationship of young *Pinus radiata* D. Don plantations in northwest Spain. *For Ecol Manage* 174, 167-176.