

Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio

F. Solla-Gullón¹, R. Rodríguez-Soalleiro¹, A. Merino² *

¹ Dpto. de Producción Vegetal

² Dpto. de Edafología y Química Agrícola
Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Lugo
amerino@lugo.usc.es

RESUMEN

El objetivo del presente fue evaluar las posibilidades del empleo de cenizas de corteza procedentes de las industrias madereras como enmendante de la acidez y fertilizante de suelos ácidos. El experimento consistió en un ensayo en macetas, realizado en condiciones de fitotrón, con aporte de dos dosis de cenizas (equivalentes a 10 y 30 Mg ha⁻¹) a un suelo forestal (pH_{KCl}: 3,7; materia orgánica: 6,5 %) con o sin aporte de (NH₄)₂SO₄. Las respuestas se compararon con el suelo sin ningún tratamiento. Para comprobar la respuesta del suelo y la vegetación, se siguió durante 2 meses la evolución de la composición de los lixiviados resultantes; al final de este período se evaluaron las modificaciones en las propiedades de los suelos, producción y estado nutricional del cultivo seleccionado (*Avena sativa*). El aporte de cenizas produjo un aumento del pH del suelo, lo que derivó en una disminución del Al en disolución. El incremento del pH producido por la ceniza sólo derivó en aumentos de la nitrificación cuando el suelo recibió NH₄. La fracción sólida del suelo también experimentó incrementos de las concentraciones de P, Ca y Mg en formas asimilables. El aporte de cenizas incrementó las concentraciones de Ca y Mg en la planta, lo que produjo aumentos proporcionales de la producción.

PALABRAS CLAVE: Fertilidad del suelo
Avena sativa

INTRODUCCIÓN

Las cenizas se obtienen por la combustión de madera o corteza de madera en diferentes industrias de fabricación de tableros y pasta de papel para la obtención de energía. Las elevadas cantidades de este residuo y el coste que representa su almacenaje ha suscitado un interés en la búsqueda de alternativas.

* Autor para correspondencia
Recibido: 16-11-00
Aceptado para su publicación: 16-5-01

Las cenizas de madera presentan contenidos importantes de diferentes nutrientes como K, P, Mg y Ca, los cuales se encuentran en formas relativamente solubles (Someshwar, 1996; Vance, 1996). Algunos de estos elementos se encuentran como óxidos, hidróxidos y carbonatos, por lo que el material presenta un fuerte carácter alcalino (Etiégni y Campbell, 1991). De este modo, el potencial neutralizante expresado en términos de equivalentes de CaCO_3 , varía entre el 25 y el 100 %, por lo que es posible su uso para corregir la acidez de suelos ácidos (Ohno y Erich, 1990). Estas cenizas presentan, en general, concentraciones muy bajas de metales pesados, si bien las extraídas con electrofiltros pueden presentar concentraciones más elevadas de metales tóxicos (Someshwar, 1996). Todas estas características hacen que en algunas zonas de EEUU y en Suecia (en este caso las cenizas proceden de plantas de bioenergía municipales) la mayor parte de las cenizas que se generan se apliquen a suelos agrícolas o forestales para mejorar sus propiedades (Vance, 1996).

Las cenizas se emplean en suelos forestales de carácter ácido puesto que cantidades moderadas de estas cenizas devuelven al sistema buena parte de los nutrientes extraídos durante el aprovechamiento forestal. En algunos casos, esta práctica se ha empleado para aliviar las deficiencias de P, Ca y Mg que presentan frecuentemente las plantaciones forestales desarrolladas sobre suelos ácidos. En este sentido, diferentes trabajos han mostrado respuestas positivas sobre el crecimiento y el estado nutricional de los árboles, lo que se atribuye a aumentos en la disponibilidad de nutrientes limitantes en el suelo (Ferm *et al.*, 1992; Vance, 1996). No obstante, hay que considerar que los suelos forestales son ricos en materia orgánica y N orgánico, por lo que los aumentos de pH en estos suelos podrían conducir a un aumento de la mineralización de N, con el consiguiente riesgo de pérdida de N en forma de NO_3^- , N_2O o N_2 a través de procesos de nitrificación y desnitrificación (Kahl *et al.*, 1996).

El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta de la aplicación de cenizas de madera a un suelo forestal ácido con anterioridad a su aporte en el campo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se empleó el horizonte A de un suelo bajo bosque de robles, un Cambisol dístico sobre esquistos de la serie de Villalba (IGME, 1975). Como propiedades químicas más importantes destacaron el alto contenido en materia orgánica (6,5 %), la fuerte acidez (pH_{KCl} : 3,7) y el bajo contenido en elementos asimilables (Ca: 78,7; Mg: 78,5; K: 69,3; P: 14,0 mg kg^{-1} , extraídos en reactivo Mehlich).

Las cenizas empleadas procedieron de la empresa Tablicia, S.A. (Lugo), y se obtuvieron de la quema de corteza de la madera de dos especies forestales, *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*.

En el ensayo se practicaron 6 tipos de tratamientos, los cuales se describen en la Tabla 1.

Las dosis de cenizas se establecieron a través de pruebas preliminares, en las que se emplearon diferentes cantidades de éstas y se determinó la variación de pH en el suelo durante dos días. Para el ensayo se emplearon macetas de polietileno (17 cm de diámetro, 9,5 cm de fondo), en las cuales se introdujo 1,35 kg de tierra tamizada por 4 mm y homogeneizada. Cada bandeja se sembró con 50 semillas de *Avena sativa* (lo que corresponde a

Tabla 1
Tratamientos practicados en el ensayo

Tratamientos	Cenizas (tm ha^{-1} , g kg^{-1} de suelo)	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (kg ha^{-1} , g kg^{-1} de suelo)
Control	0	0
CN	0	(660,7/1,11)
D10	(10,0/16,8)	0
D10N	(10,0/16,8)	(660,7/1,11)
D30	(30,0/33,6)	0
D30N	(30,0/33,6)	(660,7/1,11)

150 kg ha^{-1}). De cada tratamiento se practicaron 4 réplicas. Las macetas se mantuvieron en fitotrón durante 8 semanas con temperaturas de 25 °C durante el día y de 18 °C durante la noche. Las bandejas se regaron diariamente y cada 2 ó 3 días se recogieron los lixiviados resultantes por gravedad en el fondo de las macetas. Las disoluciones de una misma maceta recogidas durante una semana se reunieron en una única muestra para su análisis.

Al finalizar las 7 semanas los suelos se secaron a 40 °C. En el caso de los vegetales se extrajeron las partes aéreas y raíces las cuales se secaron a 65 °C y se molieron hasta 0,25 mm. En ambos tipos de muestras se analizaron los macro y micronutrientes.

Las concentraciones de C, S y N totales en cenizas, suelos y hojas se determinaron por combustión en un autoanalizador Leco. En los suelos y las cenizas, la determinación del pH en H_2O y KCl 0,1 N se realizó con electrodo de vidrio, empleando una relación suelo:disolución de 1:2,5. Los elementos asimilables (Ca, Mg, Na, K, Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) se extrajeron con reactivo Mehlich 3 (Mehlich, 1984). Las formas de Ca, Mg, Na y K que extrae este reactivo es idéntica a la del acetato amónico, mientras que para los micronutrientes es similar a la del DTPA. El P extraído es comparable al de los métodos de Olsen o Bray (Sen Tran y Simard, 1993).

En las cenizas, además, se determinaron los contenidos totales de elementos mediante digestión de la muestra molida con HNO_3 - H_2O_2 - HCl (método 3050 de la USEPA, 1986). En las muestras vegetales los elementos se determinaron después de realizar una digestión de las muestras molidas con H_2SO_4 concentrado y H_2O_2 a una temperatura de 390 °C (Jones *et al.*, 1991). En todos los casos, el P se determinó mediante colorimetría con ácido ascórbico y reactivo sulfomolibdico. El resto de los elementos se determinaron mediante un espectrofotómetro de absorción-emisión atómica. La capacidad encalante de las cenizas, expresada como equivalentes de carbonato de calcio se calculó a través de la composición elemental de las mismas según el método de Ohno y Erich (1990).

La valoración del estado nutricional del cultivo se realizó en base a los niveles foliares de macronutrientes y micronutrientes de la parte aérea, los cuales se compararon con los niveles de referencia recogidos por Jones *et al.* (1991).

Para la interpretación de los datos se realizaron análisis de varianza y el test de Tukey para distinguir los grupos significativamente distintos entre sí, análisis de regresión y correlación de Pearson, para lo que se empleó el programa informático Statgraphics.

RESULTADOS

Cenizas

La composición elemental de las cenizas empleadas se recoge en la Tabla 2. Se puede destacar la fuerte reacción alcalina y las importantes concentraciones de Ca, Mg y K, elementos que se encuentran en formas solubles. De igual modo, se pueden señalar las bajas concentraciones de N y de metales pesados. La capacidad encalante de este material, expresada como equivalentes de carbonato de calcio fue de 26 %.

Tabla 2
Composición química de las cenizas empleadas en el estudio

	Totales	Asimilables
Humedad (%)	11,5	
pH (H ₂ O)	10,4	
pH (KCl)	10,9	
Materia orgánica (%)	56,1	
C (g kg ⁻¹)	505	
N (g kg ⁻¹)	5,56	
S (g kg ⁻¹)	0,32	
P (g kg ⁻¹)	2,6	0,4 (15 %)
Ca (g kg ⁻¹)	25,0	13,8 (55 %)
Mg (g kg ⁻¹)	6,0	1,5 (25 %)
Na (g kg ⁻¹)	2,4	1,2 (50 %)
K (g kg ⁻¹)	11,1	5,0 (45 %)
Al (g kg ⁻¹)	16,2	n.d.
Cd (mg kg ⁻¹)	1,8	1,1 (59 %)
Cr (mg kg ⁻¹)	23,7	3,7 (15 %)
Cu (mg kg ⁻¹)	32,9	4,5 (14 %)
Fe (mg kg ⁻¹)	1.390	380 (27 %)
Mn (mg kg ⁻¹)	1.470	354 (24%)
Ni (mg kg ⁻¹)	14,0	8,1 (58 %)
Pb (mg kg ⁻¹)	47,0	14,0 (30 %)
Zn (mg kg ⁻¹)	1.700	44,0 (2,6 %)

n.d. = no determinado

Lixiviados

Los datos de los análisis químicos de los lixiviados se encuentran recogidos en la Tabla 3, mientras que la Figura 1 muestra las cantidades de los diferentes iones obtenidos en los lixiviados resultantes. El aporte de cenizas aumentó significativamente los valores de pH de los lixiviados con respecto a los del tratamiento control (C). De este modo, la adición de una cantidad equivalente a las 10 t m ha⁻¹ (tratamiento D10) incrementó en casi una unidad el valor medio de pH de los lixiviados, mientras que en la dosis más alta de cenizas, 30 t m ha⁻¹ (tratamiento D30), el incremento fue de casi dos unidades. La fertilización nitrogenada derivó siempre en aumentos significativos de la acidez.

Tabla 3
Valores extremos y medios de las concentraciones de los iones analizadas en los lixiviados obtenidos durante el desarrollo del experimento. Salvo el pH, las unidades son mg L⁻¹

Tratamiento	pH	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al	Mn
Control	4,7 (5,3-4,4)	2,6 (4,3-1,6)	2,9 (6,1-1,2)	0,1 (0,4-0,01)	3,7 (15,3-0,59)	1,2 (1,9-0,8)	5,3 (8,1-3,6)	0,4 (1,0-0,03)	0,2 (0,4-0,11)
CN	4,2 (4,5-4,1)	33,0 (45,9-2,0)	0,9 (1,5-0,3)	0,1 (0,2-0,02)	6,5 (9,3-4,91)	5,7 (7,2-4,1)	16,6 (23,0-10,5)	0,6 (0,9-0,4)	1,7 (2,3-1,1)
D10	5,5 (6,1-5,3)	1,3 (1,9-0,9)	3,0 (8,8-0,7)	0,1 (0,2-0,01)	27,5 (129,3-5,1)	2,8 (5,2-1,4)	4,1 (6,6-1,2)	0,3 (0,6-0,02)	0,1 (0,1-0,03)
D10N	5,0 (5,4-4,5)	12,0 (23,6-1,2)	4,1 (8,9-0,8)	0,1 (0,2-0,01)	28,5 (56,3-9,5)	7,4 (15,7-2,4)	9,0 (20,4-3,5)	0,1 (0,3-0,02)	0,5 (1,0-0,04)
D30	6,4 (7,0-5,2)	3,5 (14,9-0,3)	2,5 (7,7-0,2)	0,04 (0,1-0,001)	16,9 (31,3-7,5)	4,1 (6,2-2,0)	1,9 (4,1-0,8)	0,1 (0,3-0,02)	0,08 (0,3-0,01)
D30N	6,1 (6,9-5,0)	10,8 (18,5-0,7)	3,7 (6,6-0,5)	0,1 (0,3-0,01)	71,2 (161,0-38,9)	17,0 (31,6-9,6)	5,1 (8,0-2,4)	0,1 (0,4-0,02)	0,1 (0,2-0,05)

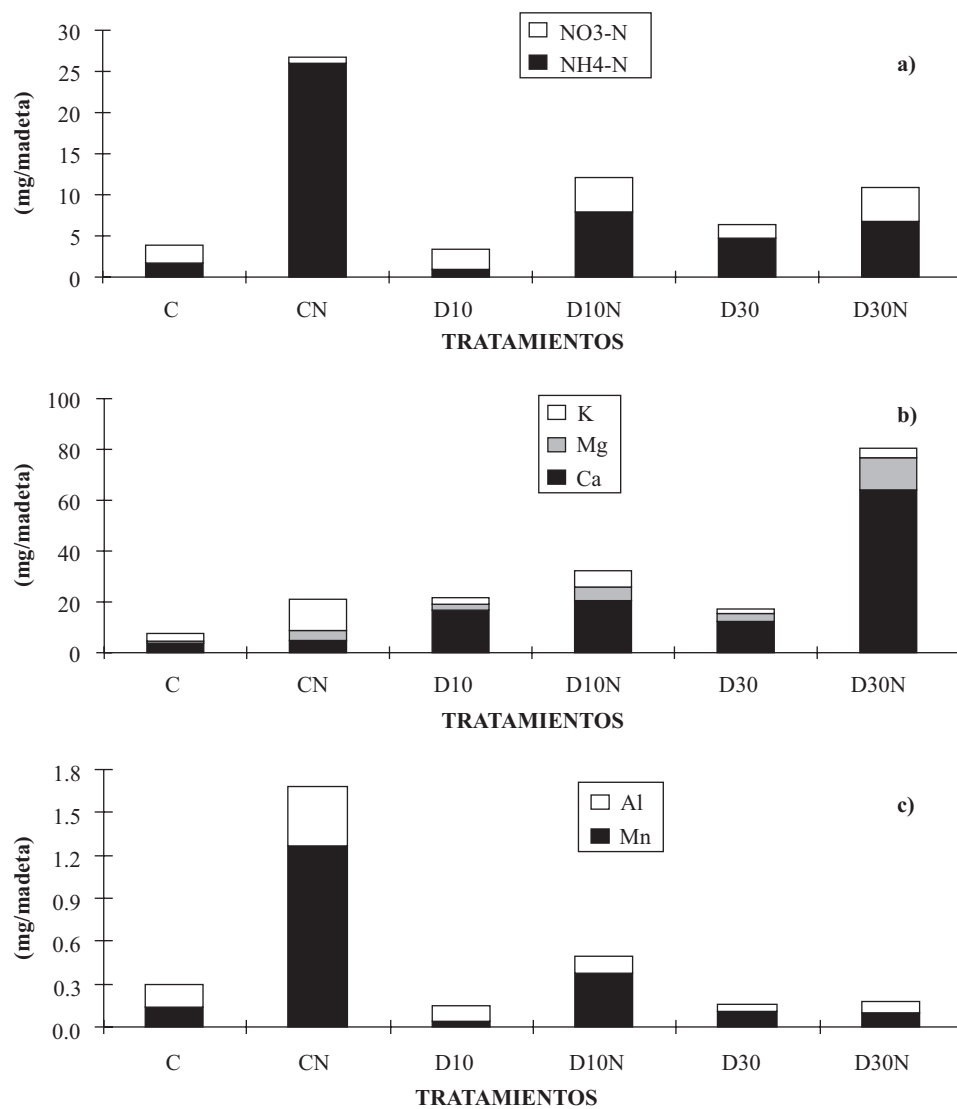


Fig. 1.—Cantidades de iones extraídos en los lixiviados (concentración × volumen) durante el ensayo para los diferentes tratamientos: a) N inorgánico, b) Ca, Mg, K y c) Mn, Al

Los suelos que no recibieron fertilización nitrogenada mostraron pequeñas concentraciones de N inorgánico (Tabla 3, Fig. 1a). Las mayores concentraciones de NH₄-N se registraron en el suelo con aporte de (NH₄)₂SO₄ sin cenizas (CN), donde el 97 % del N inorgánico se encontró en forma de NH₄. Los suelos que fueron tratados con cenizas y

(NH₄)₂SO₄ al mismo tiempo (D10N y D30N) mostraron los mayores niveles de NO₃⁻, si bien los incrementos fueron moderados y no se registraron niveles de NO₃⁻ superiores a 10 mg L⁻¹. En estos tratamientos la proporción de NO₃⁻-N representó el 35 % del N inorgánico en disolución.

La adición de cenizas incrementó la salida de Ca²⁺ y Mg²⁺ en disolución (Tabla 3, figura 1b), especialmente cuando el aporte de cenizas fue acompañado por la adición de (NH₄)₂SO₄ (tratamiento D30N). Las pérdidas de K⁺ fueron considerablemente menores a los de esos iones.

Las concentraciones de Al y Mn en los lixiviados del suelo sin tratar (C) y en el suelo tratado con fertilización nitrogenada (CN) fueron altas (Tabla 3, Fig. 1c), lo que se relaciona con la acidez que presentan estas disoluciones. El aporte de cenizas derivó en descensos importantes de las concentraciones de estos elementos en disolución, lo que se relaciona con los aumentos de pH en los lixiviados.

En consonancia con la evolución de las concentraciones de Al, Ca y Mg, las relaciones molares Ca/Al y Mg/Al en disolución aumentaron considerablemente en los suelos tratados con cenizas (Tabla 4).

Tabla 4
Valores medios y extremos de las relaciones molares Ca/Al y Mg/Al en los lixiviados recogidos

Tratamientos	Ca/Al (mol/mol)	Mg/Al (mol/mol)
Control	6 (344-1)	20 (52-1)
CN	40 (183-5)	60 (274-6)
D10	290 (780-8)	83 (211-4)
D10N	244 (500-12)	104 (226-5)
D30	269 (528-53)	110 (177-23)
D30N	1700 (3620-175)	560 (1050-130)

Ninguno de los tratamientos afectó de manera notoria a las concentraciones de fósforo en los lixiviados resultantes, las cuales fueron siempre muy bajas.

Suelos

Los resultados de los análisis químicos efectuados en la fracción sólida de cada suelo se recogen en la Tabla 5. La fuerte acidez que presentó el suelo sin tratamiento fue parcialmente neutralizada por la adición de cenizas. Los aportes de cantidades equivalentes a los 10 y 30 t m ha⁻¹ aumentaron el valor de pH del suelo en 0,9 y 1,7 unidades, respectivamente. La adición de (NH₄)₂SO₄, por el contrario, derivó en una ligera acidificación del suelo.

El contenido de P disponible en el suelo original fue bajo, inferior a 15 g kg⁻¹. El aporte de cenizas aumentó considerablemente los niveles disponibles de este elemento en el suelo, los cuales alcanzaron valores satisfactorios, cercanos a 30 mg kg⁻¹, con la dosis de cenizas más elevada.

Los contenidos de Ca, Mg y K en las muestras de suelo sin tratar fueron también reducidos. Las adiciones de cenizas aumentaron las concentraciones disponibles de estos elementos en el suelo, los cuales llegaron a niveles considerables con la aplicación de cenizas más elevada.

Ninguno de los elementos traza analizados se encontró en concentraciones elevadas que sugirieran algún tipo de toxicidad. El aporte de estas cenizas aumentó las concentraciones de Mn asimilable, mientras que produjo un descenso en los de Ni. En el resto de los elementos analizados no se encontraron modificaciones significativas.

Vegetación

La producción de biomasa (Fig. 2) fue baja en los suelos que no recibieron ningún tratamiento, así como en los suelos en los que se adicionó $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (tratamientos C y CN). La producción aumentó considerablemente después del aporte de cenizas, especialmente cuando estuvo acompañado por la fertilización nitrogenada (tratamientos D10N y D30N). Por otro lado, puede destacarse también la mayor acumulación de materia seca en las raíces de las plantas con respecto a la parte aérea (Fig. 3).

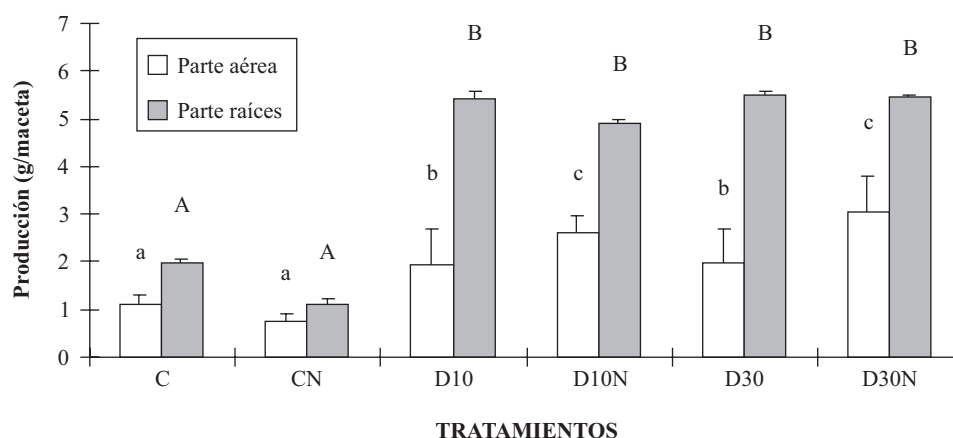


Fig. 2.—Producción de biomasa de avena en los diferentes tratamientos. Letras diferentes denotan diferencias significativas al nivel $p < 0,05$: $a < b < c$ para la parte aérea del cultivo, $A < B < C$, para la raíz del cultivo

En cuanto a los niveles de elementos en planta, el nivel de N foliar del cultivo sobre el suelo sin tratar (C) fue superior a 20 mg g^{-1} , lo que puede considerarse como aceptable (Fig. 3a). La fertilización nitrogenada incrementó el nivel de este elemento en la vegetación cuando ésta se aportó junto a la ceniza (tratamientos D10 y D30).

La concentración foliar de P en el tratamiento control fue superior a $1,5 \text{ mg g}^{-1}$, lo que puede considerarse como suficiente para este cultivo. A pesar de los aumentos de P disponible en el suelo que tuvieron lugar con los aportes de cenizas, éstos no aumentaron el nivel de este elemento en la planta (Fig. 3b).

Tabla 5
Valores medios y desviación típica del pH y elementos asimilables en los diferentes tratamientos. Letras diferentes (a < b < c) denotan diferencias significativas al nivel p < 0,05

Tratamientos	pH _{H2O}	pH _{KCl}	N %	mg kg ⁻¹										
				P	Ca	Mg	K	Mn	Fe	Ni	Cu	Cr	Cd	Pb
Control	4,68 (0,12)	3,68 a (0,19)	0,29 a (0,01)	14,0 a (0,7)	78,7 a (32,3)	78,5 a (2,7)	69,3 a (2,5)	17,6 a (0,7)	193,3 a (80,8)	1,20 ab (0,10)	1,17 a (0,31)	4,73 a (0,40)	0,067 a (0,058)	2,7 a (0,3)
CN	4,30 (0,09)	3,80 a (0,03)	0,29 a (0,001)	17,1 a (1,4)	103,3 a (29,1)	87,3 b (2,0)	105,3 c (10,7)	19,4 a (1,6)	313,3 a (113,7)	1,43 b (0,06)	0,50 a (0,56)	2,70 a (1,35)	0,067 a (0,058)	3,0 a (0,7)
D10	5,62 (0,11)	4,52 c (0,11)	0,27 a (0,01)	20,4 ab (1,8)	707,3 ab (231,5)	109,3 d (2,3)	102,0 bc (8,9)	19,0 ab (1,2)	233,3 a (30,6)	1,07 a (0,12)	1,03 a (0,55)	1,97 a (1,90)	0,100 a (0,001)	2,8 a (0,5)
D10N	4,85 (0,02)	4,13 b (0,03)	0,25 a (0,01)	19,5 ab (0,5)	469,3 ab (99,4)	103,7 c (2,4)	81,7 ab (2,9)	12,5 ab (1,6)	293,3 a (30,6)	1,07 a (0,06)	1,10 a (0,10)	4,47 a (2,75)	0,133 a (0,058)	3,6 a (0,6)
D30	6,44 (0,04)	5,61 d (0,07)	0,22 a (0,02)	29,8 c (5,7)	1442,0 d (116,2)	114,9 e (0,8)	129,3 e (15,0)	30,8 b (3,8)	260,0 a (34,6)	0,97 a (0,06)	1,30 a (0,35)	2,53 a (1,88)	0,100 a (0,001)	3,0 a (0,5)
D30N	6,07 (0,04)	5,40 d (0,01)	0,22 a (0,01)	26,9 bc (3,8)	1210,0 cd (416,9)	114,2 de (1,6)	111,0 de (5,6)	30,9 b (3,1)	206,7 a (41,6)	1,00 a (0,17)	1,07 a (0,15)	4,10 a (2,10)	0,133 a (0,058)	3,9 a (0,1)

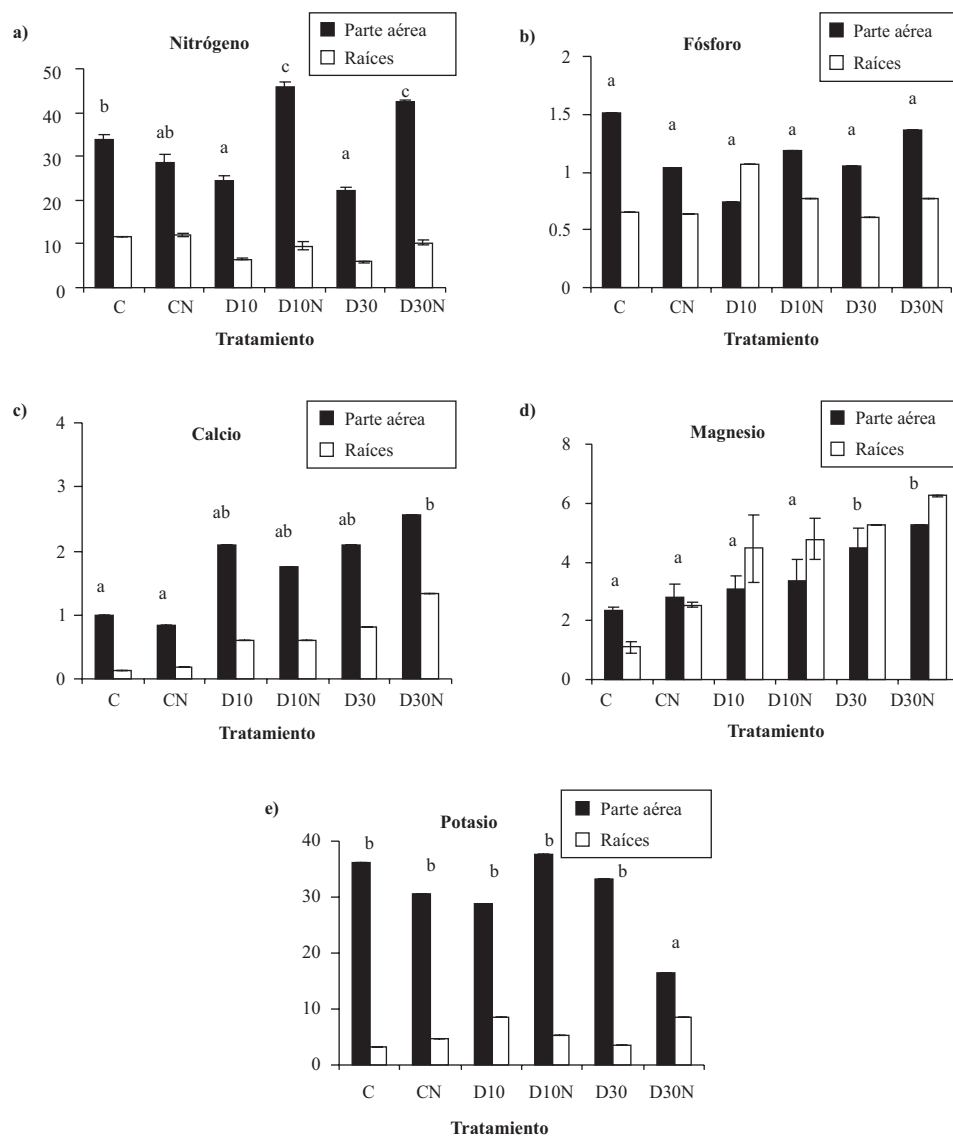


Fig. 3.—Concentraciones de elementos en la parte aérea y raíces del cultivo. Letras diferentes ($a < b < c$) denotan diferencias significativas al nivel $p < 0,05$

Los niveles de Ca en hoja de las macetas que no recibieron tratamiento (C) fueron cercanos a 1 mg g^{-1} , lo que puede considerarse bajo para este cultivo. El aporte de cenizas derivó en aumentos acusados del nivel de este elemento, que alcanzó niveles satisfactorios (Fig. 3c). Los niveles de Mg foliar en el suelo sin tratar (C) fueron

superiores al nivel crítico ($1,5 \text{ mg g}^{-1}$), si bien los tratamientos con cenizas mejoraron sustancialmente esta situación (Fig. 3d). Además, las concentraciones en planta de Ca y Mg se relacionaron significativamente con los encontrados en el suelo (Tabla 6). En relación con estos elementos, se comprobó también que el aumento de la producción se relacionó significativamente con las concentraciones foliares de Ca y Mg foliar (Tabla 7).

Tabla 6

Coefficientes de correlación entre los contenidos de elementos en el suelo y sus concentraciones en la parte aérea y raíces del cultivo

	Parte aérea	Raíces
C	0,44	-0,48
N	-0,16	0,53
S	0,5	-0,21
P	0,03	-0,36
Ca	0,79 *	0,85 *
Mg	0,83 *	0,97 *
K	-0,47	0,19
Fe	0,46	0,25

* Significativo al nivel de 0,05

Por otro lado, no se apreció ningún efecto sobre la concentración en planta de ninguno de los elementos traza analizados.

Tabla 7

Coefficientes de correlación entre la producción total del cultivo (parte aérea y raíces) y las concentraciones de nutrientes en el suelo, parte aérea y raíces

	Suelo	Parte aérea	Raíces
C	0,46	0,59	0,89 *
N	0,84 *	0,23	-0,68
S	-0,62	-0,42	-0,18
P	0,74 *	0,48	0,19
Ca	0,8 *	0,99 *	0,86 *
Mg	0,92 *	0,75 *	0,91 *
K	0,38	-0,38	0,56
Fe	-0,22	0,89 *	0,51

* Significativo al nivel de 0,05

DISCUSIÓN

La ceniza de corteza de madera empleada en este estudio mostró propiedades similares a las procedentes de otras industrias (Someshwar, 1996). Destacó la elevada alcalinidad de la suspensión de agua y las elevadas concentraciones de Ca, K, Al, Mg y P. El contenido de metales pesados de este material fue bajo con respecto a otros residuos, como lodos de depuradora o cenizas de combustión de carbón (Someshwar, 1996). Los elementos más solubles fueron el Ca, Na y K; en segundo lugar, se encontraron elementos como P, Fe y Mg, lo que coincidió, en líneas generales, con otros trabajos (Vance, 1996). No obstante, se puede destacar que los contenidos totales de P, K y Mg fueron algo inferiores a los valores medios presentados para este tipo de residuos (Someshwar, 1996).

La adición de cenizas tuvo un efecto positivo sobre la acidez y el nivel de diferentes nutrientes del suelo que limitan la producción agrícola en suelos ácidos. Diferentes trabajos han mostrado también la eficacia de las cenizas de madera para corregir la acidez de los suelos (Ohno y Erich, 1990; Vance, 1996), lo que se atribuye a la abundancia de óxidos, hidróxidos y carbonatos, principalmente de Ca, Mg y K, que confieren a este material un fuerte carácter alcalino (Etiégni y Campbell, 1991).

La reducción de la acidez del suelo modificó la dinámica de diferentes elementos. Un efecto directo fue la reducción de las concentraciones de Al y Mn en la disolución del suelo y sus consiguientes efectos fitotóxicos en suelos ácidos (Roy *et al.*, 1988; Kabata-Pendias y Pendias, 1984). El aporte de cenizas también derivó en aumentos de las concentraciones de Ca y Mg en la disolución, efecto que ha sido observado en otros experimentos similares (Clapham y Zibilske, 1992). La mayor liberación de estos elementos que se observa con la fertilización nitrogenada del suelo se debió tanto al aumento de NO_3^- y, posiblemente, de SO_4^{2-} (no determinado) en disolución, iones que podrían actuar como portadores de estos cationes.

Las relaciones molares Ca/Al y Mg/Al de la disolución del suelo se consideran indicadores del riesgo de toxicidad del Al a las plantas y de los antagonismos que impiden la asimilación de Mg en los suelos ácidos. En el suelo sin tratar estas relaciones fueron bajas, aunque se encontraron por encima de los límites considerados como negativos para el desarrollo vegetal, que son 1,0 para Ca/Al y 0,2 para Mg/Al, según Cronan y Grigal (1995). El aporte de cenizas mejoró considerablemente estas relaciones, lo que se encuentra en relación con los aumentos de Ca y Mg y los descensos de Al en la disolución del suelo.

Otros trabajos realizados en invernadero o en el campo encontraron aumentos de la producción y del crecimiento vegetal, que se relacionaron fundamentalmente con aumentos de la disponibilidad de elementos limitantes en el suelo (Erich y Ohno, 1992; Etiégni *et al.*, 1991). En el caso del Ca y Mg los aumentos de formas asimilables en el suelo se correspondieron con incrementos paralelos de las concentraciones de estos elementos en la planta y con la producción de biomasa del cultivo.

A pesar del aumento de formas disponibles de P y de K en el suelo después del aporte de cenizas, las concentraciones de estos elementos en la planta no aumentaron. La falta de respuesta pudo deberse probablemente a que estos nutrientes no se encontraron en niveles limitantes para el cultivo, como sugirieron, por ejemplo, Huang *et al.* (1992) en un ensayo de trigo y Ferm *et al.* (1992) en *Pinus sylvestris*. Sin embargo, hay que considerar también que algunos estudios han señalado la menor eficacia de las cenizas para aumentar el contenido de P disponible en el suelo con respecto a los fertilizantes minerales

convencionales (Erich y Ohno, 1990). En el tratamiento con dosis más elevada de cenizas y fertilización con N, las plantas presentaron menores concentraciones de K. Este efecto coincide con elevadas concentraciones de Mg y Ca en disolución, lo que sugiere un posible problema de competencia entre estos elementos por la adsorción de la planta (Martens *et al.*, 1970). De hecho, se pudo observar un aumento tanto de Ca como de Mg en los vegetales.

Debido a las posibles implicaciones ambientales, en el presente trabajo se ha prestado una especial atención a la dinámica del N y, en concreto, al proceso de nitrificación que podría derivar en un incremento de NO_3^- en disolución, con el consiguiente riesgo de pérdida de N. En este sentido, la nitrificación es un proceso que tiene lugar en suelos forestales de carácter ácido y cuya importancia depende, fundamentalmente, del aporte de NH_4^+ y del pH (Tamm, 1991; Meiwes *et al.*, 1998). Dada la sensibilidad del N a las variaciones de pH existe la posibilidad de que un aumento de la alcalinidad derive en un aumento de la tasa de mineralización de N y de la nitrificación. Esta posibilidad se incrementa en los suelos forestales, ricos en N orgánico.

Los resultados de este estudio muestran que el aumento de NO_3^- tiene lugar cuando se realiza al mismo tiempo un aporte de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y de cenizas, lo que indica, por una parte, que la aparición de NO_3^- en concentraciones relevantes se debe a la nitrificación del NH_4^+ añadido y no al procedente del N orgánico presente en el suelo. Estos resultados sugieren que el aporte de cenizas no debe conducir a aumentos considerables de la nitrificación cuando no va acompañado de una fertilización nitrogenada, lo que coincide con otros ensayos realizados en campo (Matzner y Meiwes, 1990; Mohamed *et al.*, 1993; Kahl *et al.*, 1996).

En relación con lo anterior, las menores concentraciones de NH_4^+ encontradas en los lixiviados de los suelos tratados con cenizas y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ se deben posiblemente a la oxidación de este ión a NO_3^- . No obstante hay que considerar también que el aumento de pH en este suelo rico en materia orgánica posiblemente derivó en aumentos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, lo que hace aumentar la adsorción de NH_4^+ en el complejo de cambio del suelo.

En cuanto a los metales pesados, las únicas modificaciones observadas se encontraron en el suelo, en donde las formas asimilables de Mn y Ni aumentaron y descendieron, respectivamente. Los aumentos de Mn se debieron posiblemente al aporte de las cenizas, las cuales presentan concentraciones moderadas de este elemento, mientras que los descensos de Ni estuvieron relacionados con el aumento de pH, que redujo la movilidad de este elemento. En algunos estudios se han descrito incluso descensos de la disponibilidad de algunos de estos metales después de la adición de cenizas como consecuencia de la menor solubilidad de éstos cuando se aumenta el nivel de pH del suelo (Huang *et al.*, 1992; Krejzl y Scanlon, 1996).

CONCLUSIONES

Los resultados de este primer ensayo de laboratorio indican que las cenizas de corteza arbórea disminuyen el grado de acidez y elevan el nivel de algunos nutrientes del suelo que son limitantes para la producción vegetal. Como consecuencia de este efecto, se mejora el nivel de nutrientes en el cultivo y se potencia considerablemente la producción.

En las condiciones del ensayo el aporte de cenizas no conduce a aumentos sustanciales de la nitrificación y de los niveles de NO_3 . Este efecto, no obstante, podría ocurrir si el aporte de cenizas va acompañado por una fertilización nitrogenada en el momento en el que los suelos se mantienen sin cultivo. Los análisis del suelo y del cultivo no confirman un aumento del nivel de metales pesados disponibles como consecuencia del aporte de cenizas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto de investigación «Manejo de restos de corta y adición de cenizas de corteza arbórea para el aprovechamiento sostenible de plantaciones forestales», financiado por el Plan Nacional I + D, del Ministerio de Educación y Cultura, y de la Asociación Galega Monte-Industria (Convocatoria, BOE 18 diciembre 1999, referencia AGF99-0604-CO2-01).

SUMMARY

Assessment of the use of wood ashes as fertilizers of acid soils

Results from a laboratory experiment in which wood ash was assessed as liming agent and fertiliser of an acid soil (pH_{KCl} : 3.7; organic matter: 6.5 %) are presented. Wood ashes were applied at rates of 10 and 30 t ha^{-1} with and without $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Composition changes in soil lixiviates and in the solid fraction, as well as the effects in yield and nutrition of oats (*Avena sativa* L.), were studied for 8 weeks after application of wood ash. Wood ashes increased soil pH, which led to decreased Al concentrations in soil solution. The increase in soil pH after ash addition produced an increased nitrification in soils with NH_4 addition. The solid fraction of ash treated soils presented a higher content of available P, Ca and Mg content. Finally the plant levels of Ca and Mg were also higher, and related to an increase in crop yield.

KEY WORDS: Wood ash
Soil fertility
Acid soils
Avena sativa

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CLAPHAM W.M., ZIBILSKÉ L.M., 1992. Wood ash as a liming amendment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23, 1209-1227.
- CRONANC., GRIGAL D.F., 1995. Use of calcium/aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems. *J. Environ. Qual.* 24, 209-226.
- ERICH M.S., OHNO T., 1992. Phosphorus availability to corn from wood ash-amended soils. *Water Air Soil Pollut.* 64, 475-485.
- ETIÉGNI L., CAMPBELL A.G., 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresour. Technol.* 37, 173-178.
- ETIÉGNI L., CAMPBELL, A.G., MAHLER R.L., 1991. Evaluation of wood ash disposal on agricultural land: I. Potential as a soil additive and liming agent. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22, 243-256.
- FERM A., HOKKANEN T., 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.
- HUANG H., VCAMPBELL 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.
- IGME, 1975. Mapa geológico de España, hoja 72 (7-6), Lugo. Ministerio de Industria, Madrid.

- JONES J.B., WOLF B., MILLS H.A., 1991. Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpreting guide. Micro-Macro Publishing, Georgia.
- KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H., 1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Florida, EEUU.
- KAHL J.S., FERNÁNDEZ I.J., LINDSEY E.R., PECKENHAM J., 1996. Threshold application rates of wood ash to an acidic forest soil. *J. Environ. Qual.* 25, 220-227.
- 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.
- MARTENS D.C., SCHNAPPINGER, JR., ZELAZSNY, L.W., 1970. The plant availability of potassium in fly ash. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 453-456.
- MATZNER E., MEIWES K.J., 1990. Effects of liming and fertilization on soil solution chemistry in north German forest ecosystems. *Water Air Soil Pollut.* 54, 377-389.
- MEHLICH A., 1984. Mehlich N. 3. extractant: a modification of Mehlich N2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15, 1409-1416.
- MEIWES K.J., MERINO A., BEESE, F.O., 1998. Chemical composition of throughfall, soil water and leaf litter in a beech forest receiving long term application of ammonium sulphate. *Plant Soil* 201, 217-230.
- MOHAMED A.D., RANGER J., SAMBRINE E., BONNEAU M., GELHAYE D., GRAINIER A., 1993. The effects of limestone and limestone plus NPK fertilization on the soil and mass balance of a spruce stand (*Picea abies* (L.) Karst.) in the Vosges mountains. *For. Ecol. Manage.* 60, 291-310.
- OHNO T., ERICH, M.S., 1990. Effect of wood ash application on soil pH and soil test nutrient level. *Agric. Ecosyst. Environ.* 32, 223-239.
- ROY A.K., SHARMA A., TALUKDER G., 1988. Some aspects of aluminum toxicity in plants. *Bot. Rev.* 54, 145-178.
- SEN TRAN T., SIMARD R.R., 1993. Mehlich III-extractable elements, En Carter M. R. (ed.), Soil sampling and methods of analysis. Canadian Soc. Soil Sci. Lewis Pub., Florida.
- SOMESHWAR A.V., 1996. Wood and combination wood-fired boiler ash characterisation. *J. Environ. Qual.* 25, 962-972.
- TAMM C.O., 1991. Nitrogen in terrestrial ecosystems. Questions of productivity, vegetation changes, and ecosystem stability. Springer-Verlag, Nueva York, EEUU.
- USEPA, U.S. Environmental Protection Agency, 1986. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods, SW-846. 3rd ed. Acid digestion of sediments, sludges and soils. USEPA Office of solid waste, Washington, DC.
- VANCE E.D., 1996. Land application of wood-fired and combination boiler ashes: an overview. *J. Environ. Qual.* 35, 937-944.