

Contenido de metales pesados en cultivos desarrollados en suelos sobre serpentinitas de Melide (A Coruña) y su relación con el manejo

S. FERNÁNDEZ, S. SEOANE & A. MERINO

*Departamento de Edafología y Química Agrícola. Escuela Politécnica Superior
Universidad de Santiago de Compostela. E-27002 Lugo*

(Recibido, mayo de 1998. Aceptado, junio de 1998)

Resumen

FERNÁNDEZ, S., SEOANE, S. & MERINO, A. (1998). Contenido de metales pesados en cultivos desarrollados en suelos sobre serpentinitas de Melide (A Coruña) y su relación con el manejo. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, **8**: 131-141

Los suelos desarrollados sobre rocas serpentinizadas presentan serios problemas para el uso agrícola debido a los elevados niveles de Mg y metales pesados (Cu, Mn, Ni y Cr) y su deficiencia en macronutrientes (P y K). En algunas zonas de Galicia, los suelos sobre serpentinitas se someten a un intenso manejo, basado en el aporte de estiércol y residuos de cosecha. Aunque estas prácticas permiten el desarrollo de los cultivos, los vegetales podrían acumular cantidades importantes de estos metales. Este estudio se realizó para evaluar la asimilación de metales pesados por los cultivos y conocer la eficacia de algunos tipos de manejo sobre los niveles de metales en planta. Los resultados mostraron que los suelos de cultivo presentaron niveles moderados de Ni y Mn, así como contenidos bajos de Cr y Cu. A pesar de ésto, los análisis de plantas revelaron elevados contenidos de Cr y Ni y moderados de Mn. Las concentraciones de Mn y Ni en plantas se correlacionaron con los contenidos extraídos en suelo. Un ensayo realizado en el laboratorio con *Festuca rubra* y *Agrostis stolonifera* puso de manifiesto que los niveles de metales en planta se reducen considerablemente después de la enmienda orgánica de estos suelos.

Palabras clave: Metales pesados, recuperación de suelos, suelos sobre serpentinitas, Galicia.

Abstract

FERNÁNDEZ, S., SEOANE, S. & MERINO, A. (1998). Plant heavy metal contents in serpentine soils from Melide (NW Spain) and the influence of the management. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, **8**: 131-141

Soils developed on serpentinitic rocks have serious limitations for agriculture. They have high levels of Mg and heavy metals (Cu, Mn, Ni and Cr) and are deficient in some macronutrients. In parts of Northwestern Spain, serpentine soils have been subjected to intensive management, based on the use of manure and harvesting residues. Although these practices have allowed the growth of crops, plants may have accumulated high amounts of metals. This study was carried out to assess the effect of the management practices on the uptake of heavy metals by crops, and to analyse the relationship between the concentrations of these metals in plants, and soil properties. Moderate levels of Ni and Mn and low levels of Cr and Cu were found in soil extractable fractions of these metals. In spite of this, analysis of plant tissues revealed high levels of Cr and Ni and moderate levels of Mn. Concentrations of Mn and Ni in foliage were correlated to soil extractable contents, whereas simple linear regression between concentration of Cr in plants and the soil extractable Cr showed a poor relationship. To assess the effects of the management on the uptake of heavy metals by plants, a complementary bioassay experiment was carried out in the laboratory, in which *Festuca rubra* and *Agrostis stolonifera* were sown on serpentine soil with low organic

matter content, and amended with peat and/or lime. This experiment confirmed that there is a reduction in heavy metal concentration in plants after organic amendment.

Key words: Heavy metals, Heavy metals in crops, soil reclamation, serpentine soils, Galicia (Spain).

INTRODUCCIÓN

El escaso desarrollo vegetal que se observa frecuentemente en suelos derivados sobre serpentinitas se atribuye a la combinación de niveles deficientes de algunos macronutrientes (P y K), desequilibrios nutricionales (baja relación Ca:Mg) y concentraciones elevadas de Mn, Ni, Cr y Cu (ROBERTS & PROCTOR, 1992).

Los estudios sobre toxicidad de metales pesados en este tipo de suelos atribuyen al Ni la mayoría de los problemas de toxicidad observados en plantas (PROCTOR & BAKER, 1994). La toxicidad por metales no se produce en todos los suelos desarrollados sobre materiales serpentiniticos, ya que el comportamiento de estos metales está vinculado tanto a factores del suelo, como al tipo de planta (ALEXANDER *et al.*, 1989). A pesar del posible riesgo de toxicidad, existe poca información sobre la disponibilidad de metales en suelos de cultivo, posiblemente por el limitado uso agrícola de estas tierras.

En Galicia existen varias áreas con rocas ultramáficas. Estudios anteriores sobre suelos naturales (GUITIÁN & LÓPEZ, 1980; CALVO & TOVAR, 1987; CALVO *et al.*, 1987) revelaron que, aunque las cantidades totales de metales pesados son elevadas, las condiciones ambientales de estos suelos (en especial pH y potencial redox) favorecen la presencia de especies poco móviles de Cr, Ni y Cu. Según estos autores no es previsible la existencia de elevadas concentraciones de estos metales en formas disponibles (CALVO & TOVAR, 1987). No obstante, en estas zonas aparecen plantas endémicas características de medios ricos en Ni, lo que sugiere que, al menos, en algunas áreas, este elemento se encuentra en forma disponible (LÓPEZ, 1978). A pesar de las limitaciones para la agricultura de estos suelos, el manejo intensivo, basado fundamentalmente

en la adición de residuos orgánicos, ha permitido el desarrollo de cultivos y pastos en zonas localizadas. Sin embargo, cabría la posibilidad de que las plantas desarrolladas sobre estos suelos puedan acumular cantidades considerables de metales pesados, lo que implicaría un riesgo para población y el ganado.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar los contenidos de metales pesados en cultivos desarrollados en suelos sobre rocas serpentinizadas y en comprobar la eficacia de algunas enmiendas sobre el nivel de metales pesados en el suelo y en la planta. El estudio se abordó en dos fases, un estudio de campo y un posterior ensayo en condiciones de laboratorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la localidad de Melide, en la provincia de A Coruña. En la zona existen rocas básicas de elevado grado de serpentización e incluyen minerales como el crisotilo y la antigorita. Los suelos más frecuentes se clasifican como Cambisoles (húmicos, crómicos y gleycos), Regosoles (móllicos y úmbricos) y Gleysoles (móllicos). En las zonas de elevada pendiente existen Leptosoles (líticos, móllicos y úmbricos). Estos suelos muestran niveles de pH cercanos a 6.0, bajas relaciones molares de Ca/Mg, textura franca o franco arcillosa y presentan elevados contenidos de metales totales, especialmente Cr, Ni, Cu y Mn (GUITIÁN & LÓPEZ, 1980).

Por lo que se refiere al clima, la precipitación media anual es alrededor de 1200 mm y la temperatura media anual es de 12 °C. La evapotranspiración potencial se cifra en 650

mm. El régimen de humedad del suelo es Údico, con un período corto de sequía en verano, mientras que el régimen de temperatura es de tipo México. Según la FAO, el clima de la región se clasifica como Subtrópico Templado con Invierno Húmedo.

Las particulares propiedades de estos suelos limitan el desarrollo de la vegetación y dan origen a ciertos endemismos vegetales, como *Plantago maritima* subsp. *serpentina*, *Alyssum guitianae* o *Armeria merinoi*, los cuales crecen en condiciones de elevados contenidos de metales pesados y desequilibrios nutricionales característicos de zonas serpentínicas (LÓPEZ, 1978). En algunas áreas, los suelos profundos y alterados se manejan de modo intensivo, en forma de pequeñas explotaciones, donde se cultivan preferentemente prados y hortalizas.

Diseño del trabajo

El estudio se realizó en dos fases, un estudio de campo y un experimento de laboratorio.

Estudio de campo

Consistió en la recogida y análisis de muestras de suelo y plantas en la mayor parte de las explotaciones agrícolas de la zona. Se seleccionaron 31 parcelas, que incluían pastos de especies variables (11 parcelas), así como los cultivos más frecuentes en la zona: col, *Brassica oleracea* (5 parcelas), centeno, *Secale cereale* (2), nabos, *Brassica napus* (5) y remolacha, *Beta vulgaris* (6). La toma de muestras, tanto de suelo como de plantas, se efectuó en octubre de 1996. En cada parcela se recogieron 9 muestras de los 12 cm superficiales de suelo, seleccionadas al azar, con las que se obtuvieron 3 muestras múltiples. Las muestras se recogieron con tubos de PVC (50 mm de diámetro). La recogida de muestra para la determinación de densidad aparente (3 por parcela) se realizó con cilindros acero inoxidable (40 mm de largo y 55 mm de diámetro). Las muestras de planta (parte aérea) se recogieron en 20 puntos de cada parcela para obtener 3 submuestras múltiples.

Ensayo en laboratorio

Este experimento se diseñó para comprobar la eficacia del aporte de materia orgánica y caliza agrícola sobre las propiedades de los suelos y el contenido de metales en planta. El material edáfico empleado se tomó en un área de aproximadamente 0.5 ha, en la que recientemente se había realizado una excavación y que mostraba un escaso desarrollo vegetal. Este material presentaba textura, valores de pH y niveles de metales pesados similares a los suelos de cultivo, pero difería de éstos en su bajo contenido en materia orgánica.

Se tomaron 50 kg de este material, que fue tamizado por 2 cm con una malla de acero inoxidable. El suelo se homogeneizó y se repartió en contenedores de plástico (18 cm de ancho x 30 cm de largo y 6 cm de fondo). Un mes antes de la siembra se adicionó caliza agrícola, turba comercial o ambos. Al mismo tiempo, se preparó otro contenedor en la que no se practicó ninguna de las enmiendas ensayadas.

La cantidad de turba añadida a cada contenedor fue el suficiente para aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo de 2 a 5 %. La cantidad de caliza a añadir se calculó para aumentar el valor de pH en KCl hasta 7.0, para lo que se construyó previamente una curva de neutralización, siguiendo el método de GUITIÁN & CARBALLAS (1976). Esto supuso una adición de caliza de 3 g de CaCO_3 por cada 50 g de suelo.

Los contenedores se sembraron, por separado, con dos especies herbáceas de medios no serpentínicos, *Agrostis stolonifera* y *Festuca rubra*. En la selección de estas dos especies se tuvieron en cuenta trabajos anteriores (MARRS & PROCTOR, 1976; JOHNSTON & PROCTOR, 1981), en los que se mostraba que éstas no mostraban especial sensibilidad a bajas relaciones Ca/Mg. Durante la experiencia los suelos se regaron cada 2-3 días para mantener el estado de humedad próximo a la capacidad de campo. Con el propósito de acelerar el desarrollo vegetal y las modificaciones en las propiedades edáficas, el experimento se desarrolló en una cámara de cultivo bajo condiciones constantes: 16 h de luz a 22 °C y 80% de humedad relativa y 8 h de oscuridad a

16 °C y 80 % de humedad relativa. El experimento incluyó un diseño en bloques completos con 3 réplicas por tratamiento (no tratado, tratado con caliza, turba y caliza+turba) y planta (24 contenedores).

La tasa de germinación se determinó 18 días después de la siembra. Después de 16 semanas de incubación se recogió el material vegetal y los suelos para posteriores análisis.

Preparación de las muestras y análisis

Las muestras de suelos recogidas en el campo y las procedentes del ensayo en laboratorio se secaron al aire y se tamizaron por 2 mm. Las muestras para la determinación de densidad aparente se secaron a 105 °C hasta peso constante.

En estas muestras se analizó pH, materia orgánica, N y S totales, cationes de cambio y metales extraíbles con EDTA (Cr, Mn, Ni y Cu). El pH del suelo se midió en KCl (relación suelo: disolución 1:2.5) con un electrodo de vidrio. Los contenidos de C, N y S totales se determinaron con un autoanalizador de combustión (LECO). Los metales pesados fueron extraídos con EDTA (20 g de suelo: 100 mL de disolución) y determinados por Absorción Atómica (LAKANEN & ERVIO, 1971). Los cationes de cambio se extrajeron con una disolución no tamponada de NH_4Cl 1.0 N y se analizaron por Absorción Atómica (Ca, Mg) o Emisión Atómica (Na, K).

Las muestras de planta se lavaron ligeramente con agua desionizada, se secaron a 60 °C y se molieron hasta pasar por un tamiz de acero inoxidable de 0.25 mm. Una submuestra de 2.5 g se calcinó a 475 °C y se disolvió con HNO_3 1.0 M. En el extracto se determinaron Cr, Mn, Ni y Cu en Absorción Atómica.

RESULTADOS

Los suelos estudiados presentaron contenidos de materia orgánica entre 2.1 y 12.3 %, y valores de pH en KCl entre 4.5 y 6.4 (Tabla I).

El contenido de Cr extraíble en EDTA en los suelos varió entre 0.1 y 0.9 mg kg^{-1} (media de 0.5 mg kg^{-1}). El análisis de varianza no reveló diferencias significativas entre los suelos dedicados a diferentes cultivos, aunque se observaron niveles algo más bajos de este metal en los suelos dedicados a remolacha (Tabla I). La Tabla II muestra los índices de correlación entre el contenido de metales extraíbles, el pH y el contenido de materia orgánica para todos los usos, mientras que en la Tabla III se recogen estos índices para el uso más común, el pasto. El contenido de Cr extraído se relaciona negativamente con el pH, mientras que en los suelos de pasto se encuentra también una relación ligeramente positiva con el contenido de materia orgánica. El rango de concentración en planta fue 0.9-11.5 mg kg^{-1} de materia vegetal seca, mientras que la media se cifró en 4.1 mg kg^{-1} . El pasto presentó los niveles de Cr más elevados, mientras que los más bajos se encontraron en la col (Tabla IV). Los niveles de Cr en planta no se relacionaron significativamente con el Cr en el suelo, ni con los otros parámetros edáficos estudiados (Tablas II y III).

El contenido de Cu extraíble fue 2-3.1 mg kg^{-1} . No se encontraron diferencias en el contenido de Cu entre los suelos dedicados a diferentes cultivos (Tabla I). El contenido de Cu en el suelo no se relacionó con el pH ni con el contenido de materia orgánica (Tabla II), aunque se encontraron dependencias entre los niveles de Cu y Mn en los suelos de pasto (Tabla III). Las concentraciones de Cu en planta fueron inferiores a 10 mg kg^{-1} , siendo la media de 6.5 mg kg^{-1} (Tabla IV). Las concentraciones más elevadas de Cu se observaron en la remolacha y centeno, mientras que las más bajas se observaron en la col. Estas diferencias, sin embargo, no resultaron significativas. Tampoco se observaron dependencia entre los niveles de Cu en planta y suelo (Tabla II y III).

El Mn extraíble varió considerablemente entre los diferentes suelos (el rango de variación fue 5.5-670 mg kg^{-1}), si bien la mayor parte de las muestras presentaron niveles inferiores a 150 mg kg^{-1} . Los niveles más elevados de Mn en

TABLA I. pH, contenido en materia orgánica (%) y metales extraíbles con EDTA (mg kg⁻¹) en muestras superficiales (0-12 cm) de suelos bajo diferentes cultivos

Cultivo	Muestras	pH (CIK)	Mat. Org.	Cr	Mn	Ni	Cu
Col	5	5.2 (0.3)	7.5 (2.5)	0.62 (0.2)	175.6 (150.1)	58.1 (42.4)	8.3 (3.8)
Centeno	2	5.1 (0.3)	7.2 (1.3)	0.63 (0.04)	37.7 (45.5)	54.1 (69.6)	5.2 (3.9)
Nabos	5	5.5 (0.7)	5.4 (1.0)	0.58 (0.29)	48.2 (26.6)	38.7 (29.9)	7.3 (4.5)
Pasto	11	5.3 (0.4)	6.1 (2.1)	0.50 (0.13)	123.3 (120.2)	58.2 (34.2)	8.4 (5.3)
Remolacha	6	5.2 (0.2)	6.2 (2.5)	0.23 (0.11)	69.3 (31.1)	56.9 (36.9)	5.3 (1.9)

TABLA II. Coeficientes de correlación de Pearson entre metales extraíbles con EDTA y algunas propiedades del suelo (31 observaciones). ** y * señalan significación al nivel de p < 0.01 y p < 0.05, respectivamente
S My P M: Contenido del metal M en suelo y planta, respectivamente

	S Cr	S Cu	S Mn	S Ni	P Cr	P Cu	P Mn	P Ni
pH (KCl)	-0.56 **	0.12	0.05	0.48 **	0.08	-0.13	-0.11	0.20
M. Org	0.12	0.41 *	0.37 *	0.25	-0.13	-0.01	0.03	-0.43 *
S Cr		-0.01	-0.04	-0.55 **	-0.15	0.12	-0.12	-0.49 *
S Cu			0.45 *	0.10	-0.07	0.13	0.54 **	-0.27
S Mn				0.22	-0.25	0.01	0.42 *	-0.17
S Ni					0.14	-0.11	-0.20	0.13
P Cr						0.09	-0.13	0.19
P Cu							0.26	-0.02
P Mn								0.13

S Cu y P Cu: Cu en suelo y planta, respectivamente

TABLA III. Coeficientes de correlación de Pearson entre metales extraíbles con EDTA en pastos y algunas propiedades del suelo (31 observaciones). ** y * señalan significación al nivel de p < 0.01 y p < 0.05, respectivamente

	S Cr	S Cu	S Mn	S Ni	P Cr	P Cu	P Mn	P Ni
pH (KCl)	-0.63 *	-0.07	0.18	0.56 *	0.04	-0.34	-0.23	0.43
M. Org	0.59 *	0.37	-0.01	-0.49	0.22	0.07	0.12	-0.64 *
S Cr		0.17	-0.02	-0.66 *	-0.14	0.49	0.19	-0.48
S Cu			0.78 **	-0.38	-0.21	0.15	0.74 **	-0.43
S Mn				-0.24	-0.42	0.13	0.89 **	-0.43
S Ni					0.50	-0.30	-0.41	0.66 *
P Cr						0.03	-0.39	0.29
P Cu							0.26	-0.38
P Mn								-0.55 *

TABLA IV. Concentración (mg kg⁻¹) de metales pesados en planta en diferentes cultivos sobre suelos de serpentinita. a > b > c, señala diferencias significativas (test de Tukey)

Cultivos	Muestras	Cr	Mn	Ni	Cu
Col	5	1.5 (0.66) a	41.6 (5.7) a	12.09 (6.37) a	4.50 (0.22) a
Centeno	2	4.65 (1.58)	46.7 (10.9)	12.65 (0.18)	7.63 (4.79)
Nabo	5	4.11 (1.51) ab	53.6 (6.5) a	18.19 (9.63) ab	7.69 (1.18) a
Pasto	11	5.66 (2.64) b	78.6 (79.8) a	15.31 (6.84) a	6.38 (5.22) a
Remolacha	6	2.39 (0.17) ab	104.0 (26.1) a	33.68 (2.07) b	8.26 (1.00) a

suelo se observaron en los cultivos de col y los más bajos, en los de centeno, aunque las diferencias no resultaron significativas (Tabla I). No se encontró tampoco ninguna dependencia entre el Mn extraído con el pH o el contenido de materia orgánica (Tablas II y III). Las concentraciones en planta variaron entre 6 y 300 mg kg⁻¹, aunque la mayor parte de las muestras presentaron niveles inferiores a 100 mg kg⁻¹. La remolacha presentó los niveles más elevados de Mn, mientras que la col, los más bajos (Tabla IV). Los niveles de Mn en planta se relacionaron con los niveles en el suelo (Tabla III).

El rango de Ni extraíble fue 5-110 mg kg⁻¹ y la media, 51 mg kg⁻¹. No se observaron diferencias significativas entre los suelos dedicados a diferentes cultivos (Tabla I). El contenido de Ni en suelo se relacionó significativamente con el pH pero no con el contenido de materia orgánica (Tablas II y III). Las concentraciones de Ni en planta oscilaron entre 3 y 35 mg kg⁻¹. En comparación con otros cultivos, la remolacha tuvo niveles más altos de Ni (Tabla IV). En los pastos los niveles de Ni en planta fueron dependientes del contenido de este metal en el suelo y del contenido en materia orgánica (Tabla III).

Modificación del contenido de metales en planta mediante enmienda orgánica y encalado

La Tabla V muestra las principales propiedades del material edáfico empleado en el experimento y las modificaciones de éstas con los dos tratamientos. Inicialmente, el suelo presentaba elevada densidad aparente (1.8 mg cm⁻³), bajo contenido en materia orgánica y muy bajos contenidos de N y S totales. También tenía muy baja relación molar Ca/Mg y elevados niveles de Cu, Mn y Ni extraíbles. Al finalizar el período de 4 meses de incubación, la adición de caliza incrementó el valor de pH (KCl), así como el contenido de Ca intercambiable y la relación molar Ca/Mg. La adición de turba redujo el pH del suelo y originó mayores niveles de N y S. Los niveles de Cr y Cu no variaron significativamente

después de ninguno de los tratamientos practicados. Después de la enmienda orgánica aumentó el contenido de Ni en el suelo bajo *Festuca* y el de Mn en el de *Agrostis*.

La tasa de germinación, medida a los 18 días de la siembra, no se vio afectada por ninguno de los dos tratamientos que fue siempre mayor para *Agrostis* que para *Festuca* (Fig. 1a). A los 4 meses de la siembra, la producción en el suelo no tratado fue baja para las dos especies, particularmente para *Agrostis*, especie que, además, mostraba claros síntomas de necrosis y clorosis. En ambas especies la producción de materia seca aumentó después del aporte de turba (Fig. 1b).

Después de los tratamientos, los niveles de metales en hojas fueron muy diferentes para las dos especies. Sin embargo, ambas respondieron de forma diferente a los tratamientos ensayados (Fig. 2). Los contenidos iniciales de todos los metales fueron superiores en *Agrostis*, que presentó niveles muy elevados para todos los metales. En esta especie la enmienda orgánica redujo considerablemente los niveles de metales, mientras que el aporte de caliza no tuvo ningún efecto (Fig. 2). En *Festuca* los niveles iniciales de metales pesados fueron muy inferiores a los de *Agrostis* y sólo se encontraron concentraciones elevadas para Ni. La incorporación de turba disminuyó notablemente el nivel de este elemento en planta.

DISCUSIÓN

Contenidos de metales pesados en suelos y cultivos: estudio de campo

Algunos trabajos realizados con anterioridad (CALVO & TOVAR, 1987; CALVO *et al.*, 1987) han puesto de manifiesto que los suelos de la zona serpentizada de Melide presentan elevados contenidos de Cr total, si bien la cantidad en forma extraíble es baja.

La cantidad de Cr extraído con EDTA en los suelos estudiados en este trabajo fue siempre inferior a 1 mg kg⁻¹, lo que concuerda con las

TABLA V. Propiedades químicas de los suelos después de la adición de turba y encalado (ensayo en laboratorio). A) *Agrostis stolonifera*, B) *Festuca rubra*

A) <i>Agrostis stolonifera</i>														
TRATAMIENTO	pH	M. O.	N (%)	S	Ca	Mg	NH ₄ Cl			EDTA				
							Cr	Mn	Ni mg kg ⁻¹	Cu	Cr	Mn	Ni	Cu
No tratado	5.51 c	1.83 a	0.05 a	0.001 a	1.67 a	12.01 a	0.12 a	10.53 a	17.13 ab	<0.01	5.45 a	106.0 ab	33.4 a	1.9 a
Cal	5.97 d	1.75 a	0.05 a	0.001 a	3.46 bc	11.39 a	0.13 a	5.99 a	3.33 a	<0.01	6.33 a	96.3 a	32.4 a	1.71 a
Turba	4.85 a	5.55 b	0.09 b	0.01 b	2.60 ab	11.65 a	0.15 a	42.69 c	25.04 b	<0.01	5.21 a	128.4 b	41.4 a	1.75 a
Cal + turba	5.28 b	5.95 b	0.11 b	0.01 b	4.91 c	12.55 a	0.07 a	27.60 b	12.49 ab	<0.01	5.99 a	102.9 a	43.6 a	1.71 a
B) <i>Festuca rubra</i>														
TRATAMIENTO	pH	M. O.	N (%)	S	Ca	Mg	NH ₄ Cl			EDTA				
							Cr	Mn	Ni mg kg ⁻¹	Cu	Cr	Mn	Ni	Cu
No tratado	5.52 c	1.85 a	0.04 a	0.0003 a	1.55 a	11.75 a	7.46 a	21.83 ab	12.56 b	<0.01	0.16 a	185.2 a	45.18 ab	2.21 a
Cal	5.93 d	1.89 a	0.05 a	0.0048 a	4.00 b	10.89 a	6.48 a	7.29 a	5.97 a	<0.01	0.13 a	105.0 a	33.04 a	1.95 a
Turba	4.92 a	6.38 b	0.09 b	0.0068 a	3.07 b	12.53 a	6.42 a	83.40 b	29.14 c	<0.01	0.13 a	187.1 a	66.26 b	1.85 a
Cal + turba	5.22 b	5.59 b	0.08 b	0.0066 a	5.35 c	12.72 a	5.74 a	77.16 ab	16.51 b	<0.01	0.25 a	211.2 a	50.78 ab	2.03 a

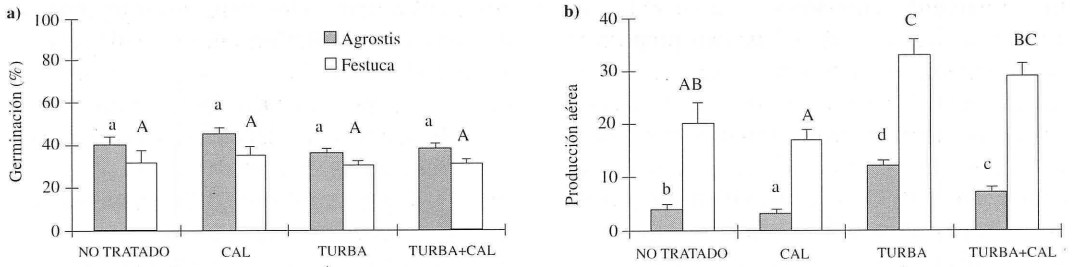


Fig. 1. Tasas de germinación después de 18 días (a) y producción de parte aérea después de 4 meses (g/contenedor) (b) de *Agrostis stolonifera* y *Festuca rubra* desarrollados sobre sustratos no tratados y corregidos.

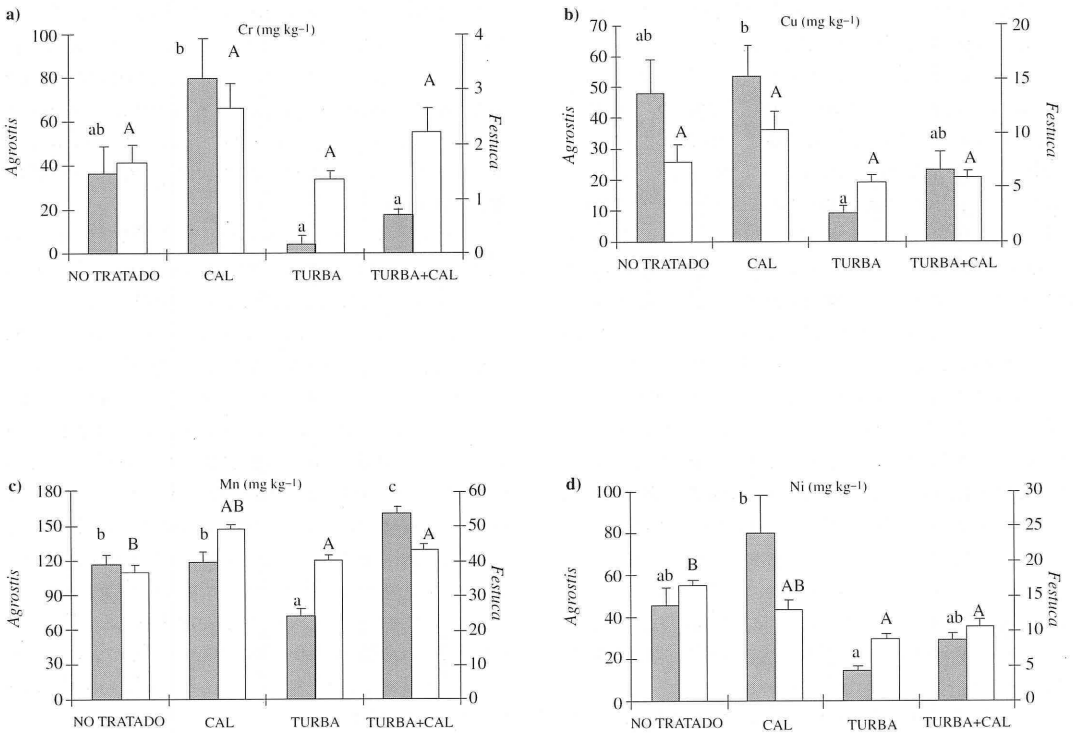


Fig. 2. Concentración de metales en partes aéreas de *Agrostis stolonifera* y *Festuca rubra* desarrollados sobre sustratos no tratados y corregidos.

investigaciones anteriores (CALVO & TOVAR, 1987; CALVO *et al.*, 1987). Esta baja proporción de Cr extraíble se puede deber a que este metal se encuentra preferentemente como CrIII, una especie que se inmoviliza fácilmente bajo formas insolubles (hidróxidos), así como por formas complejadas (ROSS & KAYE, 1994). Es preciso considerar también que la forma CrIII es mucho menos tóxica que su forma oxidada, CrVI. La reducción química del Cr puede producirse por la materia orgánica y el cromo. Además, las condiciones de pH (valores entre 5.5 y 6.5) y Eh (valores superiores a 500 mV) de los suelos estudiados favorecen la existencia de la especie reducida (CALVO *et al.*, 1987).

En contraposición con los bajos contenidos de Cr extraíble de los suelos, la mayoría de las plantas analizadas presentaron moderados o, incluso, elevados niveles de este elemento. De este modo, las concentraciones de cromo, en algunos cultivos, resultaron similares a las existentes en áreas contaminadas y nueve de los cultivos estudiados superaron el nivel de toxicidad dado por KABATA-PENDIAS & PENDIAS (1984) y ALLOWAY (1990). Estos niveles resultan más elevados de lo esperado en función de los niveles de metal encontrados en los suelos. Además, hay que considerar la baja movilidad de este metal en la planta. Así, la mayor parte del Cr asimilado se retiene por las raíces y, sólo una pequeña parte es transportada a la parte aérea (JAMES & BARLETT, 1984). MISHRA *et al.* (1997) encontraron resultados similares y sugirieron que los altos contenidos de Cr en planta podrían deberse a la coexistencia de los dos estados de oxidación y a la posibilidad de que ambos puedan comportarse como formas bioasimilables.

Aunque el contenido de Cu total en los suelos del área es elevado (CALVO & TOVAR, 1987), las cantidades de este metal en forma asimilable fueron similares a los encontrados en suelos agrícolas no contaminados (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1984; ALLOWAY, 1990). El elevado contenido en materia orgánica y los valores de pH superiores a 6 favorecen la inmovilización de Cu en el suelo. Este elemento presenta una gran

reactividad frente a los compuestos orgánicos y es escasamente soluble a valores de pH superiores a 5 (ROSS & KAYE, 1994). Los niveles de cobre en planta también fueron bajos (5 mg kg⁻¹), lo que está en concordancia con las bajas cantidades en forma extraíble en el suelo. Además, las bajas cantidades de Cu en planta también podrían responder a la baja absorción de este elemento que presentan algunos vegetales (JONES, 1972).

Los suelos estudiados presentaron contenidos de manganeso extraíble que pueden considerarse elevados. En la mayoría de los casos las concentraciones en planta (en torno a 300 mg kg⁻¹) se encontraron próximos a los niveles de toxicidad (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1984). La relación observada entre las concentraciones extraíbles de Cu y Mn, puede deberse a que ambos elementos presentan comportamientos geoquímicos parecidos, así como una afinidad similar por sustancias húmicas y por radicales inorgánicos.

El Ni extraíble se encontró en niveles elevados, lo que es característico de suelos de otras zonas serpentinizadas (PROCTOR & BAKER, 1994). El análisis de correlación puso de manifiesto una dependencia positiva entre el níquel extraíble y el pH del suelo. Este hecho podría deberse a que el Ni es un elemento que se pierde progresivamente a medida que el suelo se desarrolla, lo cual coincide con un descenso de pH que se produce como consecuencia de evolución del suelo. Este comportamiento ha sido estudiado por KAUPENJOHANN & WILCKE (1995) quienes observaron descensos en el Ni extraído con EDTA y del cambiante después de la acidificación experimental, llevadas a cabo en suelos desarrollados sobre serpentinitas.

Las concentraciones de Ni en plantas fueron similares a las encontradas en otros trabajos de suelos sobre rocas ultrabásicas (PROCTOR & BAKER, 1994). Este elemento tiende a acumularse fácilmente en la planta. La acumulación de Ni en la planta está muy relacionado con la cantidad de Ni extraíble en el suelo, así como con la gran movilidad de este elemento en el vegetal (MIZUNO

& NOSAKA 1992). Las mayores cantidades de este elemento encontradas en remolacha frente a la existente en otros cultivos, podría explicarse por la gran asimilabilidad de este elemento por este cultivo (HUNTER & VERGNANO, 1952).

A pesar de los elevados contenidos en hojas, el examen detallado de los cultivos no reveló síntomas de fitotoxicidad, como clorosis, amarilleamiento apical o daños en las raíces. En relación con esto, otros bioensayos, realizados con avena (*Avena sativa*), no mostraron relación entre contenidos de Ni en planta y síntomas de fitotoxicidad (UREN, 1992; PROCTOR & BAKER, 1994). Estos investigadores sugieren que la tolerancia de algunas especies al níquel deriva de un mecanismo que limita su absorción y traslocación en la planta, haciendo posible la acumulación de este elemento, bajo formas no tóxicas. No obstante, la ausencia de síntomas de toxicidad por Ni podría quizás relacionarse con altos niveles de Mg en las plantas (ROBERTSON, 1985), aspecto que no fue comprobado en el presente trabajo.

Modificación de las propiedades del suelo y del contenido en metales pesados en plantas mediante enmiendas orgánicas y prácticas de encalado: ensayo en laboratorio

El escaso desarrollo de *Festuca rubra* y *Agrostis stolonifera* en los suelos sin tratar pudo deberse, por un lado, a las desfavorables propiedades físicas del material edáfico y, por otro, al elevado contenido de algunos metales. De hecho, las concentraciones de Cr, Cu y Ni de *Agrostis* desarrollado en los suelos no tratados, fueron muy superiores a las encontradas en los cultivos desarrollados en condiciones naturales. Según KABATA-PENDIAS & PENDIAS (1984) estos niveles pueden ser suficientes para limitar el desarrollo vegetal.

La incorporación de materia orgánica al suelo supuso un aumento de su porosidad, lo que pudo contribuir a un mayor desarrollo de las dos especies estudiadas. El incremento de producción experimentado en los suelos que recibieron aporte de turba estuvo acompañada de una

reducción de Cr, Cu y Ni en las hojas. Al mismo tiempo, las plantas mostraban un aspecto más vigoroso y un mejor desarrollo.

A diferencia de *Agrostis*, en *Festuca* la relación entre el aumento de producción y descenso de metales pesados no fue tan clara. La adición de turba dio lugar a mayores producciones en esta especie y a la reducción en los contenidos de metales pesados, aunque en mejor grado que en *Agrostis*.

A pesar de la disminución de la concentración de metales pesados en ambas especies, no se registraron cambios en las fracciones extraíbles en el suelo. Esto está en concordancia con la falta de correlación observada en el estudio de campo entre el contenido en cultivos y los niveles extraíbles en el suelo.

El encalado, a diferencia de lo que ocurrió con la adición de turba, no tuvo ningún efecto significativo sobre el desarrollo de las dos especies estudiadas. Las dosis de caliza agrícola utilizadas no modificaron las cantidades extraíbles de metales pesados ni las concentraciones en las plantas. Estos resultados difieren de los encontrados por HALSTEAD (1968), que comprobó una disminución en la toxicidad de metales pesados al incrementar el pH de suelos desarrollados sobre serpentinitas. En nuestro caso, la falta de respuesta se debió, posiblemente, a que el pH del suelo inicialmente ya se encontraba próximo a la neutralidad, lo que ya era favorable para la existencia de formas poco móviles de los metales.

CONCLUSIONES

Los cultivos estudiados presentaron elevadas concentraciones de Cr y Ni, a pesar de que las cantidades extraíbles de estos metales fueron bajas. De todas formas, los distintos cultivos acumularon cantidades muy diferentes. Algunos de ellos, como la remolacha, mostraron niveles tóxicos de Ni. La enmienda orgánica de estos suelos favoreció el mejor desarrollo de los cultivos y disminuyó los niveles de metales en planta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Prof. Dra. Rosa Calvo de Anta la revisión crítica del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, E. B., ADAMSON, C., ZINKE, P. J. & GRAHAM, R. C. (1989). Soils and conifer productivity on serpentinized peridotite of the Trinity Ophiolite, California. *Soil Sci.*, **148**: 412-423.
- ALLOWAY, B. J. (1990). *Heavy Metals in Soils*. John Wiley & Sons, New York.
- CALVO, R., MACÍAS, F. & BUURMAN, P. (1987). Procesos de alteración y neoformación mineral en medios serpentiniticos de Galicia. *Lab. Xeol. Laxe*, **11**: 161-170.
- CALVO, R. & TOVAR, C. (1987). Limitaciones a la fertilidad en áreas serpentinizadas de Galicia. *An. Edafol. Agrobiol.*, **46**: 433-448.
- GUITIÁN, F. & CARBALLAS, T. (1976). *Técnicas de Análisis de Suelos*. Pico Sacro, Santiago de Compostela, España.
- GUITIÁN, F. & LÓPEZ, I. (1980). Suelos de la zona húmeda española. Serpentinias. I. Morfología y datos generales. *An. Edafol. Agrobiol.*, **39**: 403-415.
- HALSTEAD, R. L. (1968). Effect of different amendments on yield and composition of oats grown on a soil derived from serpentine material. *Can. J. Soil Sci.*, **48**: 301-305.
- HUNTER, J. G. & VERGNANO, O. (1952). Nickel toxicity in plants. *Annals of Appl. Biol.*, **39**: 279-284.
- JAMES, B. R. & BARTLET, R. J. (1984). Plant soil interactions of chromium. *J. Environ. Qual.*, **13**: 67-70.
- JOHNSTON, W. R. & PROCTOR, J. (1981). Growth of serpentine and non-serpentine races of *Festuca rubra* in solutions simulating the chemical conditions in a toxic serpentine soil. *J. Ecol.*, **69**: 855-869.
- JONES, J. B. (1972). Plant Tissue Analysis for Micronutrients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **14**: 319-346.
- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. (1984). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, Florida.
- KAUPENJOHANN, M. & WILCKE, W. (1995). Heavy metal release from a serpentine soil using and pH-stat technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59**: 1027-1031.
- LAKANEN, E. & ERVIO, R. (1971). A composition of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils. *Acta Agric. Tenn.*, **123**: 223-232.
- LÓPEZ, I. (1978). *Contribución al Estudio de los Suelos sobre Serpentinias*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, España.
- MARRS, R. H. & PROCTOR, J. (1976). The response of serpentine and non-serpentine *Agrostis stolonifera* L. to magnesium and calcium. *J. Ecol.*, **64**: 953-964.
- MISHRA, S., SHANKER, K., SRIVASTAVA, M. M., SRIVASTAVA, S., SRIVASTAVA, R., DASS, S. & PRAKASH, S. (1997). A study on the uptake of trivalent and hexavalent chromium by paddy (*Oriza sativa*): possible chemical modifications in rhizosphere. *Agricul. Ecosyst. Environ.*, **62**: 53-58.
- MIZUNO, N. & NOSAKA, S. (1992). The distribution and extent of serpentinized areas in Japan. In: Roberts, B. A. & Proctor, J. (Eds.), *The Ecology of Areas with Serpentinized Rocks. A World View*: 271-311. Kluwer Academic, Dordrecht, Holland.
- PROCTOR, J. & BAKER, A. J. (1994). The Importance of Nickel for Plant Growth in Ultramafic (Serpentine) Soils. In: Ross, S. M. (Ed.), *Toxic Metals in Soil-Plant Systems*: 417-432. John Wiley & Sons, New York.
- ROBERTS, B. A. & PROCTOR, J. (1992). *The Ecology of Areas with Serpentinized Rocks: A World View*. Kluwer Academic, Dordrecht, Holland.
- ROBERTSON, A. I. (1985). The poisoning of the roots of Zea Mays by nickel ions and the protection afforded by magnesium and calcium. *New Phytologist*, **100**: 173-189.
- ROSS, S. M. & KAYE, K. J. (1994). The meaning of metal toxicity in soil-plant systems. In: Ross, S. M. (Ed.), *Toxic Metals in Soil-Plant Systems*: 27-61. John Wiley & Sons, New York.
- UREN, N. C. (1992). Forms, reactions, and availability of nickel in soils. *Adv. Agronomy*, **48**: 141-203.