VARIACIONES DEL CONTENIDO DE ZINC EN SUELO Y PLANTA TRAS LA APLICACIÓN DE LODOS DE DEPURADORA EN UN SISTEMA SILVOPASTORAL

López-Díaz M.L. [1], Mosquera-Losada M.R.[2], Rigueiro-Rodríguez A.[2]
1 Dpto Biología y Producción de los Vegetales, Centro Universitario de Plasencia, C.P. 10600, Plasencia (Cáceres), España. E-mail: lurdesld@unex.es
2 Dpto. Producción Vegetal, Escola Politécnica Superior de Lugo, C.P. 27002, Lugo, España. E-mail: romos@correo.lugo.usc.es

Resumen

En España, el empleo de lodos de depuradora urbana en agricultura se encuentra regulado por el *R.D. 1310/1990*, en el que se tiene fundamentalmente en cuenta el contenido de metales pesados de suelo y lodo. El objetivo de este ensayo fue evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas calizas y lodos de depuradora durante tres años sobre la concentración total de Zn en suelo y planta, así como sobre su disponibilidad en suelo en un sistema silvopastoral. Para ello se realizó un ensayo de campo en el que se sembraron *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata* y *Trifolium repens* bajo una plantación de *Pinus radiata* de cinco años. La fertilización orgánica incrementó el contenido total y disponible de Zn en el suelo y en el pasto. Sin embargo, los valores obtenidos en planta con la fertilización orgánica se pueden considerar aptos para el consumo animal.

Palabras clave: *Lolium perenne, Dactylis glomerata, Trifolium repens*, fertilización orgánica, *Pinus radiata*, nitrógeno.

INTRODUCCIÓN

El *Plan Nacional de Lodos (2001-2006)* pretende favorecer la aplicación de lodos de depuradora urbana al suelo como fertilizante, gracias a su contenido en materia orgánica y nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, que de otra forma se perderían e incluso podrían causar problemas de contaminación. Los lodos, que contienen productos de deshecho procedentes de industrias, pueden llevar incorporados elementos tóxicos en cantidades elevadas, como metales pesados, que constituyen la principal limitación a su utilización en agricultura. En muchos casos son elementos esenciales, pero tóxicos en determinadas concentraciones, como Fe, Zn, Cu, Mn, pero en otros carecen de funciones esenciales reconocidas y poseen una elevada toxicidad, como Pb, Cr, Ni, Hg y Cd. El aporte de lodos de depuradora al suelo puede afectar a su disponibilidad, tanto por las dosis añadidas con ellos como por las modificaciones inducidas en las características edáficas, como ocurre con el pH, que condicionan su solubilidad, de forma que, en la mayoría de los casos, cuanto más ácido sea el suelo más fácil resultará su absorción por las plantas (Pomares y Canet, 2001). La absorción por las plantas está condicionada tanto por la concentración y disponibilidad del propio elemento como por la especie vegetal y la interacción con los diversos macro y micronutrientes (Mosquera et al., 2001). Así, la acumulación de estas sustancias en tejidos u órganos es variable, ya que algunas plantas poseen mecanismos de bloqueo a nivel radicular. Algunos pueden causar problemas a los animales, debido a que pueden acumularse en alguna parte del vegetal, de forma que lleguen a alcanzarse concentraciones perjudiciales para los animales, pero sin efecto adverso en las plantas (Felipó, 1994). Por todo ello, la aplicación de lodos al suelo puede originar una disminución del rendimiento de los cultivos y puede ocasionar problemas de toxicidad en los animales o en las personas que los consuman. Los principales riesgos de toxicidad son debidos, entre otros, al zinc, debido a que las plantas lo absorben fácilmente. Además, estos elementos son acumulables en el suelo y pueden pasar bastantes años hasta que desaparezcan sus efectos tóxicos (Pomares y Canet, 2001). El empleo de estos residuos en agricultura se encuentra regulado por el *R.D. 1310/1990* en el que se limita, fundamentalmente, el contenido de metales pesados de suelo y lodo, así como las cantidades medias anuales que se pueden aplicar durante un período de dos años.

El objetivo de este ensayo fue evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas calizas y lodos de depuradora durante tres años sobre la concentración de Zn en suelo y planta, así como en su disponibilidad en suelo en un sistema silvopastoral situado en la provincia de Lugo.

MATERIAL Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en una finca de titularidad privada ubicada en el Término Municipal de Pol, provincia de Lugo, a una altitud de 510 m.s.n.m, con una precipitación media anual de unos 1083 mm. Se trataba de un suelo de monte, asentado sobre pizarras, con una profundidad superior a 50 cm, que no había sido empleado con fines agrícolas. Es un suelo muy ácido (pH en agua 4,97, pH en ClK 4,30) y con una relación C/N alta, como consecuencia del elevado contenido de materia orgánica (12,32%) respecto a la cantidad de nitrógeno presente que, sin embargo, también es alta (0,52%). A pesar de ser rico en nitrógeno, éste se encuentra en su mayor parte en forma no disponible. El sustrato de la parcela en la que se desarrolla el ensayo se caracteriza, además, por su pobreza en fósforo (0,03%), por su escasa proporción de bases intercambiables y por tener un porcentaje de saturación de aluminio elevado (55,13%). El contenido inicial de Zn en suelo (17,2 mg kg^{-1}) era muy inferior al límite permitido por la ley para la aplicación de lodos de depuradora (R.D. 1310/1990) (150 mg kg^{-1} para suelos con pH menor de 7).

El ensayo comenzó en octubre de 1997. Se estableció un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. En cada una de las parcelas (de 96 m^2) se aplicó la fertilización empleada normalmente en la zona para la instalación de praderas, que consiste en el aporte de 120 kg P_2O_5 ha^{-1} y 200 kg K_2O ha^{-1}. A continuación, se procedió a la siembra de la siguiente mezcla de especies: 25 kg ha^{-1} de *Lolium perenne* L. cv `Brigantia`, 10 kg ha^{-1} de *Dactylis glomerata* L. cv `Artabro` y 4 kg ha^{-1} de *Trifolium repens* L. cv `Huia`. Los tratamientos ensayados consistieron en la aplicación de 3 dosis de lodos de depuradora urbana que equivalían al aporte de 160 (L1), 320 (L2) y 480 (L3) kg N/ha y año, respectivamente, además de un tratamiento control de no fertilización (NF), los mismos tratamientos complementados o no con cal (2,5 t caliza/ha), y la fertilización comúnmente aplicada en la zona (500 kg 8:24:16/ha, MIN). Las enmiendas calizas se realizaron al mismo tiempo que la siembra, mientras que los tratamientos de fertilización se aplicaron en mayo de 1998 y en marzo de 1999 y 2000. El lodo empleado, que procedía de una planta de depuración de aguas urbanas situada en Lugo, presentaba un porcentaje de materia seca del 25%, pH 7 y unos contenidos medios de nitrógeno y potasio de 2,31% (N) y 1,53 cmol(+) kg^{-1} (K), respectivamente. Los valores de metales pesados del lodo y suelo estaban muy por debajo de los niveles establecidos por la legislación española para la aplicación de estos residuos con fines agrícolas (RD 1310/1990). Las dosis de lodo de depuradora se basaron en su contenido total en nitrógeno (25% mineralizable el primer año). El aprovechamiento del pasto se realizó mediante siega. Previamente, se llevaron a cabo ocho muestreos de suelo y pasto, coincidentes en el tiempo, que tuvieron lugar en julio y diciembre de 1998 y en mayo, julio y noviembre de 1999 y 2000. Las muestras de suelo fueron tomadas a dos profundidades distintas, 5,5 y 25 cm, con la ayuda de sondas. En cada muestra se tomó alrededor de 1 kg de suelo procedente de tres puntos diferentes de cada parcela elegidos al azar. El muestreo más superficial tenía como fin conocer exactamente el efecto de la aplicación del lodo de depuradora en la disponibilidad del Zn, debido a que, según diversos autores (Barbarick *et al*., 1998; Berti y Jacobs, 1998) los metales pesados aportados con los lodos prácticamente no se mueven por debajo de donde se incorporan y, además, en esta profundidad se concentran una buena parte de las raíces de las especies pascícolas. El muestreo realizado a 25 cm es el que define la legislación española relativa a la aplicación de lodos de depuradora en tierras agrarias (R.D. 1310/1990), que debe realizarse para determinar si por sus contenidos de metales pesados el suelo es apto para el empleo de estos residuos.

La concentración total de Zn en el suelo se determinó, tras digestión con aqua regia ($HF+HCl+NO_3H$) (VARIAN, 1989), en un microondas CEM MDS-2000, que permite controlar la presión. Las cantidades que se encontraban en forma asimilable se obtuvieron por medio de una disolución extractora Mehlich 3 (Mehlich, 1985). El análisis de los contenidos de Zn en pasto se realizó tras una digestión con ácido nítrico en vasos cerrados a una presión controlada en un microondas CEM MDS-2000 (CEM, 1994). Las mediciones de los contenidos totales y de la fracción que se encuentra en forma fácilmente disponible de Zn, así como su concentración en el pasto se realizaron mediante absorción atómica con un espectrofotómetro VARIAN 220FS, según la metodología propuesta por el fabricante (VARIAN, 1989). Todos los datos se analizaron estadísticamente mediante un ANOVA, y las medias fueron separadas mediante el test de Duncan.

RESULTADOS

En la figura 1 se puede observar que, en el segundo año del ensayo y dependiendo de la época de muestreo, la **cantidad total de Zn** en el suelo varió significativamente con el encalado, que a su vez influyó en la respuesta que tuvo esta variable a la aplicación de lodos en 2000. Hasta 1999 inclusive, el tipo de fertilización empleado causó modificaciones significativas en la concentración de Zn total en el sustrato, aunque en el primer año éstas dependieron también del muestreo realizado. En julio de 1999, la presencia de Zn era mayor en aquellas parcelas que se habían encalado previamente. En la mayoría de los casos, la aplicación de lodos de depuradora, cuya proporción en zinc era de entre 746 y 1.320 mg/kg según los años, incrementó el zinc en el suelo. En general, no se observaron respuestas claras a las distintas dosis ensayadas.

Durante todo el ensayo, la respuesta del **Zn asimilable** (figura 2) a la aplicación de lodo varió en función de si se encaló o no previamente y según la época del año. En julio de 1999 la cantidad de Zn extraída con Mehlich 3 en donde se había aplicado la dosis alta de lodo (L3) era superior si se había encalado previamente, diferencia que no se mantiene en los siguientes muestreos. El aporte de lodo provocó una mejora en la disponibilidad del Zn, principalmente a partir del segundo año, aunque en el caso de la dosis alta esta respuesta se adelantó a diciembre de 1998. En general, no se observaron respuestas claras a las distintas dosis ensayadas. En julio y diciembre de 1998 y en mayo de 1999 la evolución del zinc asimilable en función de los distintos tratamientos de fertilización siguió las ecuaciones recogidas en la figura 2, que presentaron un alto coeficiente de correlación.

Desde el segundo año del ensayo, el contenido de **zinc en el pasto** (figura 3) resultó afectado significativamente por el tratamiento de fertilización aplicado y por la época del año. Además, en 1999 la concentración de Zn en planta presentó un máximo en otoño, aunque esta tendencia no se observó en los otros años del ensayo. La aplicación de lodos de depuradora incrementó el contenido de zinc en planta en el otoño de 1999 (15,73 mg kg-1 frente a 20,98-51,75 mg kg^{-1}). Esta misma respuesta positiva se obtuvo en los dos últimos muestreos de 2000 (23,47-25,50 y 29,72-34,13 mg/kg frente a 19,10 y 13,20 mg/kg en el tratamiento de no fertilización, en julio y noviembre, respectivamente). Durante todo el ensayo, los resultados obtenidos con la fertilización mineral, tanto en planta como en suelo, no fueron significativamente diferentes a los observados donde no se fertilizó y, en algunos casos, fueron menores que los de la fertilización orgánica.

DISCUSIÓN

Los **valores totales de zinc** obtenidos en este ensayo (7,60-60,67 mg kg^{-1}) (figura 1) se encuentran en la mayoría de los casos dentro del intervalo señalado por Loué (1988) como típico de suelos ácidos muy lavados (10-30 mg kg^{-1}). En ningún momento se superó el máximo permitido por la legislación española para el uso agrícola de lodos de depuradora. Las **cantidades asimilables de zinc** (figura 2) fueron similares a las obtenidas por Monterroso *et al*. (1999) en zonas de escombreras (0,6-33,2 mg kg^{-1}), y fueron aumentando al pasar el tiempo debido a los aportes de los lodos.

En julio de 1999, la presencia de Zn en el suelo era mayor en aquellas parcelas que se habían encalado previamente, probablemente como consecuencia del contenido de este elemento en la caliza (107,7 mg Zn kg^{-1} caliza). Esto ayudado con el pH elevado de la caliza, que lo inmoviliza, reduce la capacidad de solubilidad de este elemento en el suelo y por tanto de su lavado del sistema, a pesar de los menores insumos realizados en comparación con los lodos. En esa misma fecha, la cantidad de Zn extraída con Mehlich 3 en donde se había aplicado la dosis alta de lodo (L3) era superior si se había encalado previamente**.** El incremento en el contenido total y asimilable de Zn en el suelo provocado por los aportes en suelos ácidos de residuos procedentes de depuradora se encuentra ampliamente documentado (Illera *et al*., 1999), si bien esta respuesta es menor si la elevación del pH es muy alta (Williams *et al*., 1987) y llega a ser nula en suelos básicos en los que los lodos no producen cambios substanciales en el pH (Canet *et al*., 1998).

El pasto obtenido en los distintos tratamientos (figuras 4.65 y 4.66) presentó contenidos en zinc (9,6-52,3 mg/kg) que, en la mayoría de los casos, se situaron por debajo del umbral indicativo de la existencia de deficiencias en planta (25 mg kg^{-1}) (Jones, 1972). Sólo en algunas ocasiones, en donde se había aplicado la fertilización orgánica, se detectaron concentraciones consideradas como normales en planta por Jones (1972) (25-150 mg kg^{-1}). También, en muchas ocasiones, las

concentraciones de Zn en planta fueron menores que los valores recogidos por Mosquera y González (2004) (22,1-38,4 mg kg^{-1}) en pastos de Galicia desarrollados en zonas agrícolas más fértiles. En ningún caso se superaron los máximos tolerables para ovino (300 mg kg^{-1}), vacuno y equino (500 mg kg^{-1}) (NRC, 1980).

Según Mosquera y González (2004), la concentración de Zn presenta un máximo en otoño, que en nuestro caso sólo se observa en 1999. En el primer año esto podría ser debido a la reciente implantación del pasto. En el último año podría ser consecuencia del incremento en la presencia de dactilo, especie que no acumula este elemento, que ha sido proporcional a la dosis de lodo aplicada, residuo que incrementa el contenido de Zn en el suelo.

El empleo de lodos de depuradora produjo un incremento en la concentración de Zn en el pasto, al igual que obtuvieron otros autores (Tiffany *et al*., 2000), desde finales de 1999. La ausencia de respuestas significativas en los muestreos anteriores, a pesar de los aportes de este elemento realizados por los lodos (12,80-38,40 kg/ha según las dosis, en total en los tres años) y de la mejora que provocaron en la disponibilidad, podría explicarse por los bajos niveles de Zn en el suelo de partida, y por el incremento en estos tratamientos de la proporción de especies que no acumulan este nutriente, como el dactilo (Genevini *et al*., 1983) o el raigrás inglés (Hopkins *et al*., 1994). Además, el incremento en la producción de pasto observado en donde se aplicó la fertilización orgánica (López-Díaz, 2004) podría significar también un efecto de dilución. El aporte de abono mineral no modificó los valores de Zn en suelo, tanto totales como asimilables, ni en pasto, debido a que este elemento no es aportado con este tratamiento.

En conclusión, la fertilización orgánica incrementó el contenido total y disponible de Zn en el suelo y en el pasto. Sin embargo, los valores obtenidos en planta con la fertilización orgánica se pueden considerar aptos para el consumo animal.

BIBLIOGRAFÍA

Barbarick, K.A.; Ippolito, J.A. & Westf-all, D.G.; 1998. Extractable trace elements in the soil profile after years of biosolids application. J. Environ. Qual. 27: 801-805.

Berti, W.R. & Jacobs, L.W.; 1998. Distribution of trace elements in soil from repeated sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.* 27: 1280-1286.

BOE del 01/11/1990. Real Decreto 1310/1990 del 29 octubre 1990, que regula la utilización de los lodos de depuración. Ministerio Agricultura, Pesca y Alimentación.

BOE 12/07/01; 2001. Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales 2001-2006.

Canet, R.; Pomares, F.; Tarazona, F. & Estela, M.; 1998. Sequential fractionation and plant availability of heavy metals as affected by sewage sludge applications to soil. *Commun. In Soil Sci. Plant Anal.* 29(5-6): 697-716.

CEM; 1994. Microwave digestion applications manual. CED (eds.). USA.

Felipó-Oriol, T.; 1994. La Qualitat dels Biosòlids com a Fertilitzans i com a Esmenes Orgàniques. R. Mujeriego y L. Sala (eds.), Universitat Politécnica de Catalunya: 19-31.

Genevini, P.L.; Vismara, R. & Mezzanotte, V.; 1983. Utilizo agricolo dei fanghi di depurazione. *Ingegnieria ambientale* 12(9): 1-133.

Hopkins, A.; Adamson, A.H. & Bowling, P.J.; 1994. Response of permanent and reseeded grassland to fertilizer nitrogen. 2. Effects on concentrations of Ca, Mg, K, Na, S, P, Mn, Zn, Cu, Co and Mo in herbage at a range of sites. *Grass and Forage science*. 49: 9-20.

Illera, V.; Walter, I.; Cuevas, G.; & Cala, V.; 1999. Biosolid and municipal solid waste effects on physical and chemical properties of a degraded soil. *Agrochimica*. Vol. XLIII-N, 3-4: 178-186.

Jones, J.B.; 1972. Plant tissue analysis for micronutrients. En: Micronutrients in Agriculture. Soil Sci. Soc. Of Amer. Madison 14: 319-346.

López-Díaz, M.L.; 2004. Fertilización con lodos de depuradora urbana en sistemas silvopastorales. Tesis doctoral. Univ. Santiago de Compostela.

Loué, A.; 1988. Los microelementos en agricultura. Ed. Mundi-Prensa.

Mehlich, A.; 1985. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. In soil sci. plant anal*. 15(12): 1409-1416.

Monterroso, C.; Álvarez, E. & Fernández-Marcos, M.L.; 1999. Evaluation of Mehlich 3 reagent as a multielement extractant in mine soils. *Land degradation and development*. 10: 35-47.
Mosquera-Losada, M.R. y González-Rodríguez, A.; 2004. Fertilización nitrogenada y potásica en pradera mixta: I. Efectos sobre el nivel de microelementos. ***SEEP. Pastos.*** XXXI (2): 233-248.
Mosquera-Losada, M.R., López-Díaz, M.L, & Rigueiro-Rodríguez, A.; 2001. Sewage sludge fertilisation of a silvopastoral system with pines in Northwestern Spain. *Agroforestry systems*. 53:1-10.
NRC; 1980. Mineral Tolerance of Domestic Animals. National Academic Press.
Pomares, F. y Canet, R; 2001. Residuos orgánicos utilizables en agricultura: origen, composición y características. En: Aplicación agrícola de residuos orgánicos. J. Boixadera y M. Rosa-Teira (eds.). Univ. Lleida. 195-213.
Tiffany, M.E.; McDowell, L.R.; O`Connor, G.A.; Nguyen, H.; Martin, F.G.; Wilkinson, N.S. & Cardoso, E.C.; 2000. Effects of pasture-applied biosolids on forage and soil concentrations over a grazing season in North Florida. II. Microminerals. ***Commun. In Soil Sci. Plant Anal***. 31(1-2): 215-227.
VARIAN; 1989. Analytical methods. VARIAN (eds.). Australia.
Williams, D.E.; Vlamis, J.; Pukite, A.K. & Corey, J.E.; 1987. Metal movement in sludge amended soils: a nine years study. *Soil Science*. 143 (2): 124-131.

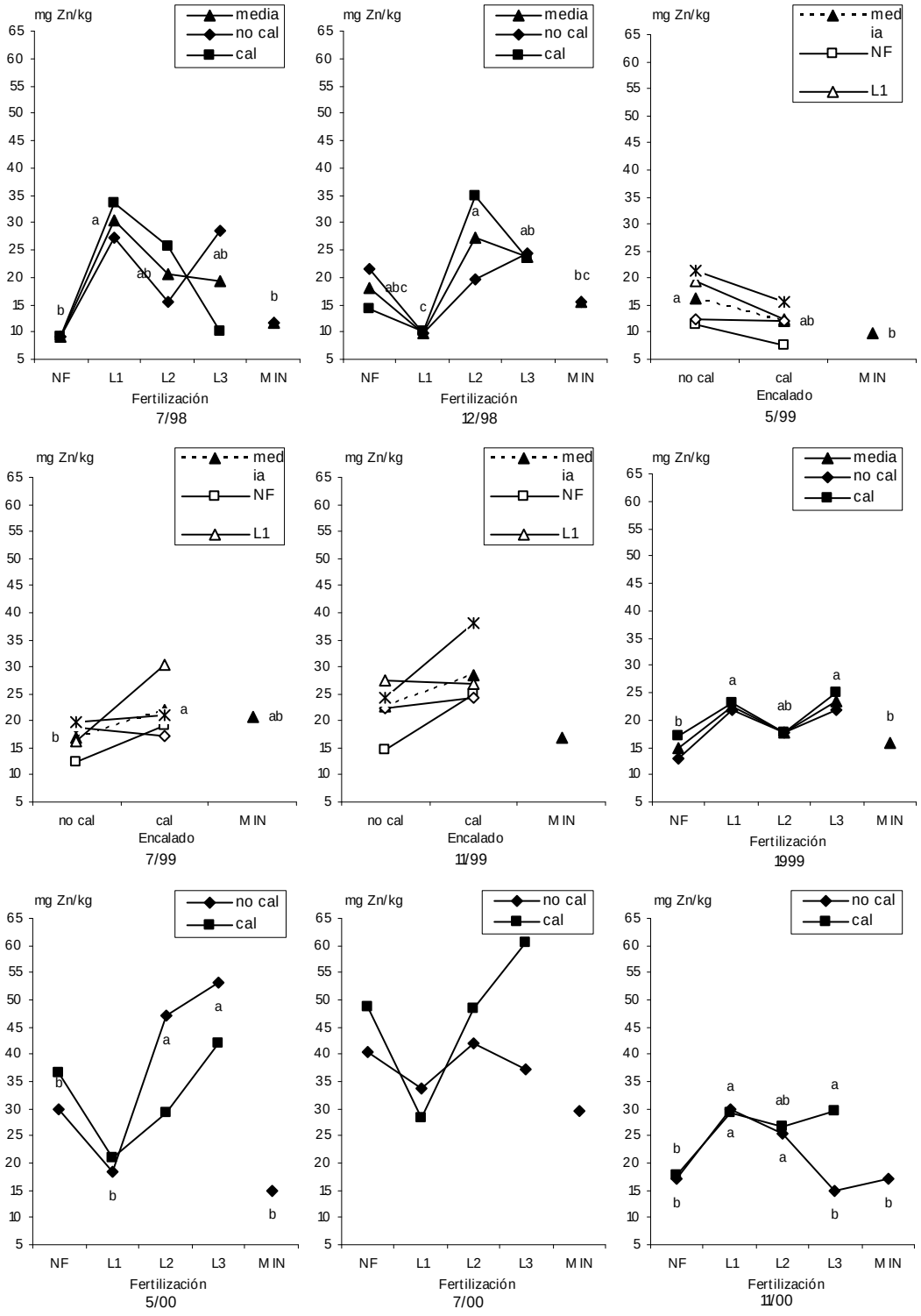

Figura 1. Contenido total de zinc (mg Zn/kg) en el suelo (25 cm) para los diferentes tratamientos de encalado y fertilización en los tres años de estudio. N: dosis de nitrógeno (t/ha y año); NF: no fertilización; L1: dosis baja de lodo (0,16 t N/ha); L2: dosis media de lodo (0,32 t N/ha); L3: dosis alta de lodo (0,48 t N/ha); MIN: 500 kg/ha 8:24:16; no cal: no encalado; cal: 2,5 t/ha CO_3Ca. Letras distintas indican medias significativamente diferentes entre tratamientos de cal (--▲--), de fertilización para cada dosis de cal (♦: no cal; ■: cal) o para la media de ambas (▲).

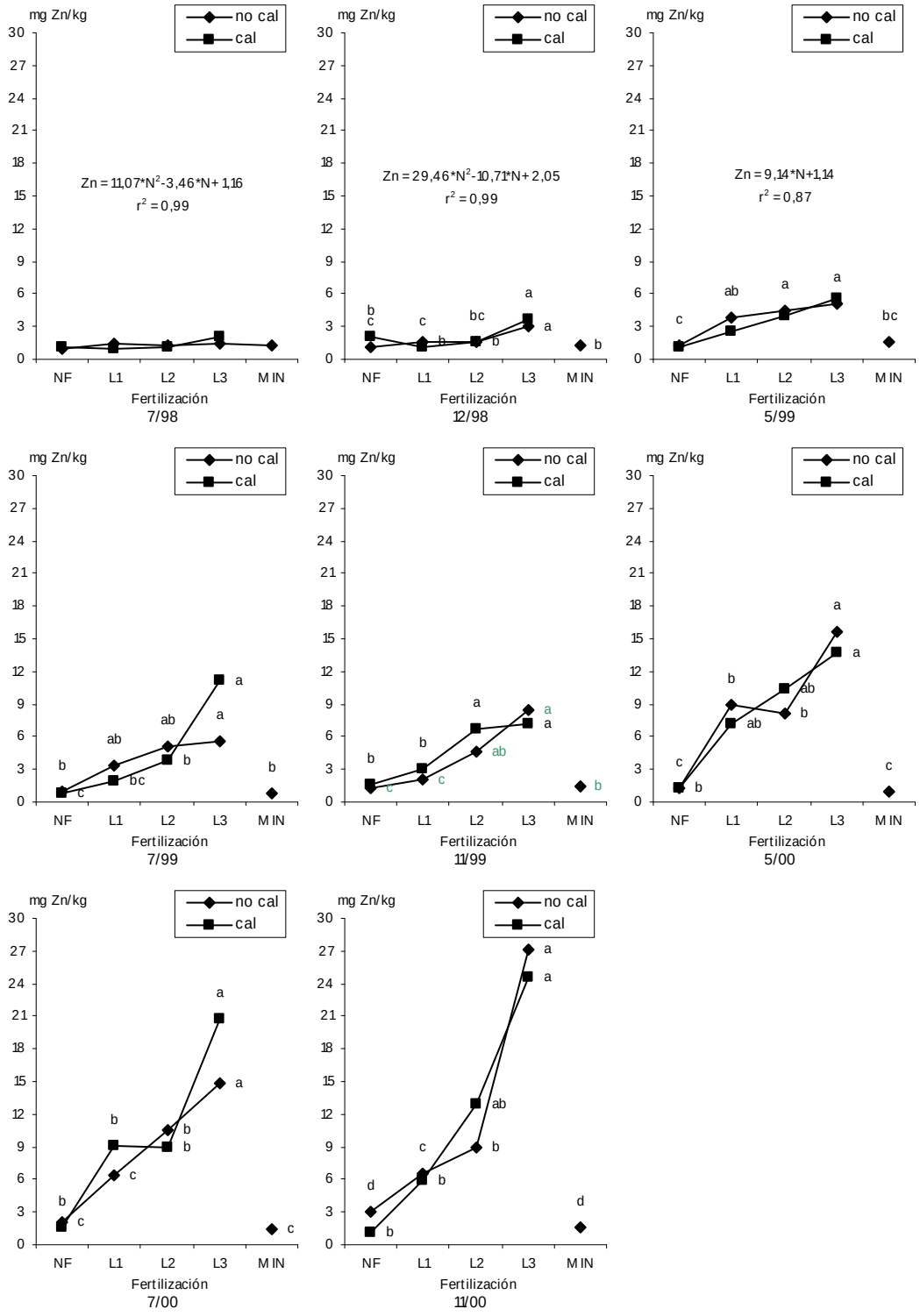

Figura 2. Contenido de zinc asimilable (mg Zn/kg) en el suelo (5,5 cm) para los diferentes tratamientos de encalado y fertilización en 1999 y 2000. N: dosis de nitrógeno (t/ha y año); NF: no fertilización; L1: dosis baja de lodo (0,16 t N/ha); L2: dosis media de lodo (0,32 t N/ha); L3: dosis alta de lodo (0,48 t N/ha); MIN: 500 kg/ha 8:24:16; no cal: no encalado; cal: 2,5 t/ha CO_3Ca. Letras distintas indican medias significativamente diferentes entre tratamientos de fertilización para cada dosis de cal (♦: no cal; ■: cal).

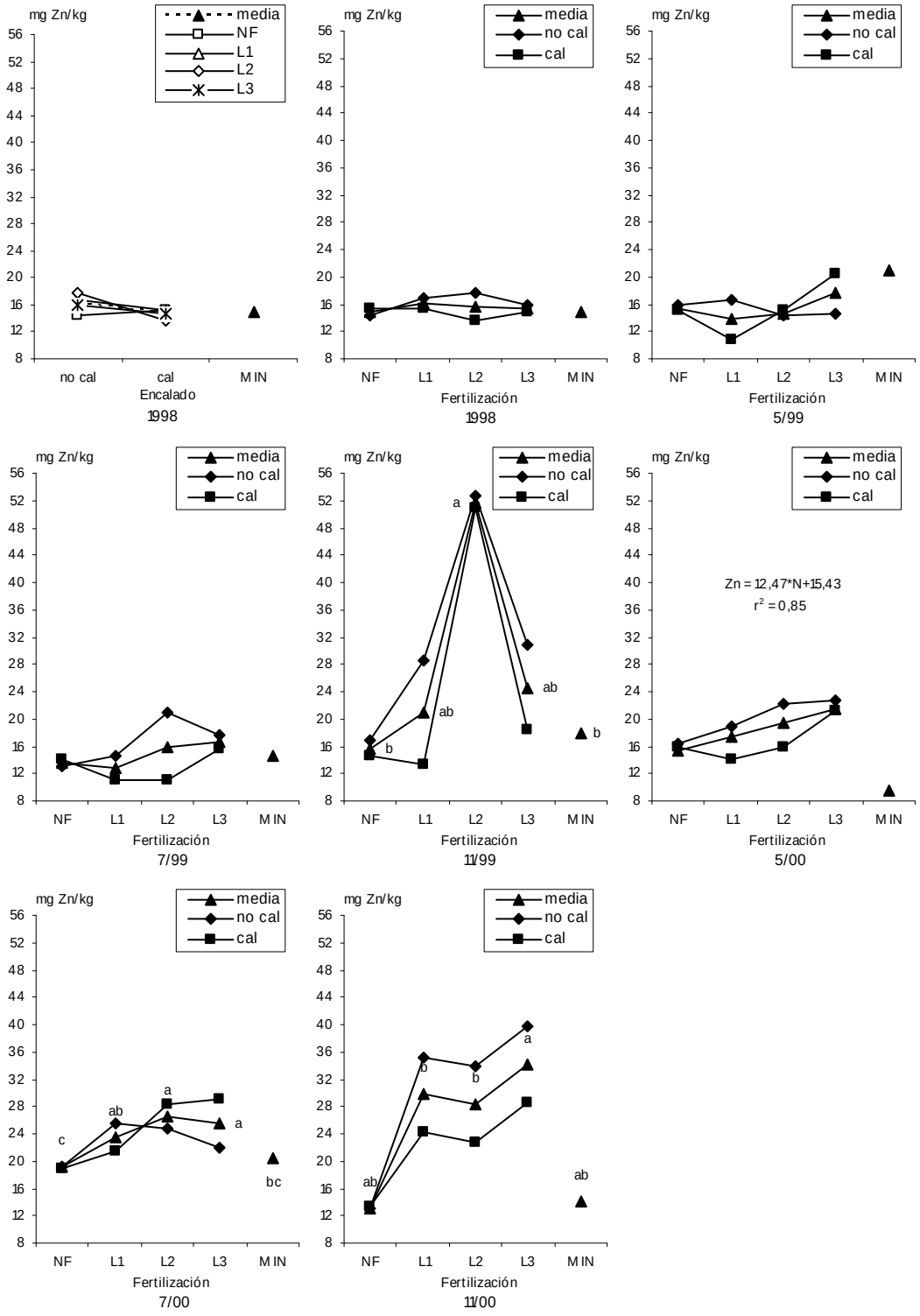

Figura 3. Contenido de zinc (mg/kg) en el pasto para los diferentes tratamientos de encalado y fertilización en los tres años del ensayo. N: dosis de nitrógeno (t/ha y año); NF: no fertilización; L1: dosis baja de lodo (0,16 t N/ha); L2: dosis media de lodo (0,32 t N/ha); L3: dosis alta de lodo (0,48 t N/ha); MIN: 500 kg/ha 8:24:16; no cal: no encalado; cal: 2,5 t/ha CO_3Ca. Letras distintas indican medias significativamente diferentes entre tratamientos de fertilización (▲).