

M.M. Delgado, R. Miralles de Imperial, C. Rodríguez y J.V. Martín

**INFLUENCIA DE LA FERTILIZACIÓN CON LODO SECADO TÉRMICAMENTE EN
LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO DE TRES CULTIVOS DE CEREAL**

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **109** N.º 2 (135-149), 2013

<http://dx.doi.org/10.12706/itea.2013.009>

Influencia de la fertilización con lodo secado térmicamente en las propiedades químicas del suelo de tres cultivos de cereal

M.M. Delgado¹, R. Miralles de Imperial, C. Rodríguez y J.V. Martín

INIA, Departamento de Medio Ambiente, Ctra. de La Coruña Km. 7,5, 28040 Madrid, España

Resumen

En este trabajo se aborda el estudio del aprovechamiento agronómico de los lodos residuales procedentes de estaciones depuradoras de la zona centro de España, con objeto de determinar el efecto que tiene el lodo secado térmicamente en las propiedades químicas del suelo de tres cultivos de cereal (cebada, avena y trigo). El ensayo se llevó a cabo en campo durante 4 años. Se evaluaron los siguientes tratamientos: control (Testigo); mineral (M) con 300 kg/ha de un abono triple 15-15-15 (N; P; K) y los lodos 5000 (L 1), 8000 (L 2) y 12000 (L 3) kg/ha de lodo secado térmicamente. Los resultados obtenidos muestran que los suelos fertilizados con lodo experimentan un incremento de pH, de la conductividad eléctrica, materia orgánica y del contenido en nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio. La concentración total de los metales pesados; zinc, cobre y níquel aumentó respecto al suelo testigo después de cuatro años, pero no hubo riesgos de contaminación.

Palabras clave: Lodo de depuradora, cebada (*Hordeum vulgare*), la avena (*Avena sativa*), trigo (*Triticum aestivum*).

Abstract

Influence of thermally dried sewage sludge fertilization on soil chemical properties of three cereal crops

This paper deals with the study of agronomic use of sewage sludge from sewage plants of central Spain; in order to determine the effect of thermally dried sludge in soil chemical properties of three cereal crops (barley, oats and wheat). The test was carried out in the field for 4 years. Four treatments were evaluated: control (C), mineral (M) with 300 kg / ha of a 15-15-15 fertilizer (N, P, K) and 5000 (L 1), 8000 (L 2) and 12000 (L 3) kg / ha of thermally dried sludge. The results obtained showed that sludge-amended soils undergo an increase in pH, electrical conductivity, organic matter and nitrogen content, phosphorus, calcium and magnesium. The total concentration of heavy metals, zinc, copper and nickel increase compared to control soil after four years, but there was no risk of contamination.

Key words: Sewage sludge, barley (*Hordeum vulgare*), oat (*Avena sativa*), wheat (*Triticum aestivum*).

1. Autor para correspondencia: delgado@inia.es
<http://dx.doi.org/10.12706/itea.2013.009>

Introducción

Desde el punto de vista agronómico, la materia orgánica es esencial para mejorar la fertilidad y la estructura del suelo. Por lo que aquellos que tienen un escaso contenido se consideran suelos de baja productividad (Rodríguez et al., 2009).

La disminución de la materia orgánica en los suelos roturados con prácticas convencionales puede determinar la evolución del suelo y acelerar los procesos de degradación, lo cual se vuelve especialmente relevante en condiciones climáticas semiáridas (Romanyà et al., 2007). Una alternativa para revertir estos procesos regresivos, está en el aporte de enmiendas orgánicas que producen cambios significativos sobre las diferentes fracciones de la materia orgánica del sistema, incrementando el contenido en carbono orgánico de los suelos a medio y largo plazo (Pedra et al., 2007).

Hoy en día, el uso de enmiendas orgánicas para restaurar, mantener o aumentar los contenidos de materia orgánica del suelo y mejorar sus funciones físicas, químicas y biológicas es una de las prácticas más comunes, eficientes y baratas (Fernández et al., 2009). Sin embargo, las enmiendas orgánicas usadas tradicionalmente, como los estiércoles o las turbas, en la actualidad no son suficientes para cubrir la demanda existente, lo que hace preciso buscar materiales alternativos provenientes de muy distintas fuentes (Saviozzi et al., 1999); dentro de esta lista de nuevas enmiendas orgánicas destacan por su abundancia y disponibilidad los residuos orgánicos urbanos (Mandal et al., 2007) y los lodos de depuradora (Antolín et al., 2005). España presenta una gran producción anual de lodos procedentes del tratamiento de las aguas residuales (Mosquera-Losada et al., 2010), por lo que el empleo de estos residuos como enmienda orgánica en suelos agrícolas resulta doblemente beneficioso, por un lado, por el déficit de materia orgánica y el bajo

contenido en metales pesados de nuestros suelos (MMA 2006) y por otro, por la reutilización de dichos residuos, lo cual supone una posible solución respecto a su almacenamiento en vertederos o a su incineración (Plaza et al., 2006).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que los residuos orgánicos plantean también una serie de inconvenientes y restricciones cuando se aplican al suelo debido a su origen y composición heterogénea, pueden causar problemas muy diversos tales como la acumulación de metales pesados, la incorporación de microorganismos patógenos, contaminantes orgánicos, pesticidas, fármacos, etc. especialmente cuando proceden de vertidos industriales (Singh y Agrawal, 2008).

Por todo ello, antes de aplicar los lodos al suelo y con el fin de hacer un uso correcto y eficiente de los mismos en agricultura cumpliendo los requisitos sanitarios y medioambientales, es necesario un tratamiento previo y una posterior caracterización del producto final (Ramírez et al., 2008) lo que ayudará a establecer la dosis adecuada a los requerimientos de cada cultivo en el marco de una agricultura sostenible.

En 2006 se inició un experimento de campo en la Finca "La Canaleja", situada en Alcalá de Henares (Madrid). El objetivo fundamental de este trabajo fue estudiar en condiciones de campo los efectos de la aplicación del lodo secado térmicamente a varias dosis sobre las propiedades químicas de un suelo y los posibles riesgos de contaminación representativo de un agroecosistema semiárido.

Materiales y métodos

El experimento se ha desarrollado en la finca experimental "La Canaleja" perteneciente al INIA situada en el término municipal de Alcalá de Henares (Madrid). El suelo se puede

clasificar como Haploxeralf calciortidico según criterios USDA (MAPA, 1994). El suelo tiene textura franco arcillosa, con un contenido en carbonatos en torno al 5% y cuyas características químicas se reflejan en la tabla 1.

Tabla 1. Características del suelo
Table 1. Soil Characteristics

Parámetro	Suelo
pH 1:2,5 H ₂ O	8,42
C.E., 1:5 H ₂ O dSm ⁻¹	0,17
N Total, g kg ⁻¹	0,89
Carbono orgánico total, g kg ⁻¹	6,88
Relación C/N	7,73
P (Olsen), mg kg ⁻¹	23,01
K (acetato amónico), mg kg ⁻¹	426,01
Cu, mg kg ⁻¹	9,00
Zn, mg kg ⁻¹	50,00
Pb, mg kg ⁻¹	9,00
Ni, mg kg ⁻¹	7,50
Cr, mg kg ⁻¹	3,00
Cd, mg kg ⁻¹	<0,2

Diseño experimental

El experimento constó de parcelas de 100 m² (20 x 5 m) con una rotación de cultivos de cereales: cebada/avena/trigo. La labor de alzado para levantar el rastrojo de cereal se realizó con arado de vertedera, una profundidad de 25-30 cm con tempero del suelo en los meses de septiembre-octubre. Después de alzarlo se dio un pase de cultivador con el que se incorporó el abono.

El diseño experimental fue mediante bloques al azar con tres repeticiones.

Los tratamientos fueron:

- Mineral: 300 kg ha⁻¹ 15-15-15 (N; P; K)
- Lodo 1: 5000 kg ha⁻¹ lodo secado térmicamente
- Lodo 2: 8000 kg ha⁻¹ lodo secado térmicamente
- Lodo 3: 12 000 kg ha⁻¹ lodo secado térmicamente
- Testigo: sin fertilización

La incorporación del lodo secado térmicamente: Lodo 1 (5000 kg/ha), Lodo 2 (8000 kg/ha) y Lodo 3 (12000 kg/ha) que corresponde al nitrógeno aportado por el lodo y el necesario para la planta, se realizó en los años 2005 y 2007 en la segunda quincena de octubre, para evitar contaminación del suelo debido al efecto residual del lodo.

El sistema de aplicación consistió en la distribución del lodo en el suelo con el propósito de evitar la contaminación de parcelas adyacente. Inmediatamente después el lodo fue incorporado al suelo mediante labores con cultivador. Posteriormente se realizó la siembra del cereal mecánicamente a inicios de noviembre con una densidad de 140 kg/ha de semilla, equivalente a una 300 plantas/m².

Se seleccionó cebada (*Hordeum vulgare*) variedad Kika R-1, avena (*Avena sativa*) variedad Prevision R-1 y trigo blando (*Triticum aestivum*) variedad Astral R-1, por su buena adaptación a las condiciones bioclimáticas y por ser un cultivo frecuente en la zona de estudio. En junio de cada año se realizó la recolección de la cosecha con una micro-cosechadora –Wintersteiger modelo Classic– con 1,25 metros de peine, apropiado para trabajar con parcelas como las de este experimento.

Las muestras de suelo se tomaron antes y después de la cosecha con un equipo de barrenas Eijkelkamp de media caña para muestreo seccionado. Los análisis realizados, tras secado al aire y tamizado a 2 mm de luz de

Tabla 2. Características del lodo secado térmicamente (media de 2005 y 2007 \pm Desviación estándar)
 Table 2. Sewage sludge thermally- dried characteristics
 (average of 2005 and 2007 \pm Standard deviation)

Parámetro	Valor medio	Límites UE pH >7
Humedad (%)	7,3 \pm 1,7	
pH (1:2,5 H ₂ O)	7,2 \pm 0,1	
C.E. (dSm ⁻¹ 1:5,0 H ₂ O)	2,3 \pm 0,5	
Nitrógeno Kjeldahl (gkg ⁻¹)	42 \pm 10,0	
Carbono orgánico total (gkg ⁻¹)	540 \pm 62,0	
Relación C/N		12,86
Fósforo -P- (mgkg ⁻¹)	30000 \pm 5000 (25000-35000)	
Potasio -K- (mgkg ⁻¹)	5000 \pm 200,0	
Calcio -Ca- (mgkg ⁻¹)	32000 \pm 4000 (28000-36000)	
Sodio -Na (mgkg ⁻¹)	700 \pm 100,0	
Magnesio -Mg- (mgkg ⁻¹)	8000 \pm 2000 (6000-10000)	
Hierro -Fe- (mgkg ⁻¹)	17000 \pm 1000 (16000-18000)	
Cobre -Cu- (mgkg ⁻¹)	241,5 \pm 68,5	1750,0
Plomo -Pb- (mgkg ⁻¹)	30,0 \pm 10,0	1200,0
Cromo -Cr- (mgkg ⁻¹)	31,6 \pm 3,1	1500,0
Zinc -Zn- (mgkg ⁻¹)	930,5 \pm 193,0	4000,0
Níquel -Ni- (mgkg ⁻¹)	40,6 \pm 10,4	400,0
Cadmio -Cd- (mgkg ⁻¹)	0,2 \pm 0,2	40,0

malla, fueron: el pH se midió en una suspensión suelo/agua (1:2,5), para la medida de la conductividad eléctrica (dSm⁻¹), se utilizó un conductímetro midiéndose en un extracto acuoso (1:5,0) (MAPA, 1994). El carbono orgánico oxidable, por el método de Walkey-Black (APHA, AWWA, WPCF. 2005). La concentración de nitrógeno total se determinó siguiendo el método Kjeldahl, (Hesse, 1971).

El contenido de P, K, Ca y Mg, así como los metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cu, Pb y Cd) se midieron por espectrofotometría de emisión de plasma previa digestión ácida (HNO₃/HCL, 1:3) (Sims y Kline 1991).

El lodo de secado térmicamente fue suministrado por el Ayuntamiento de Madrid. Este fue obtenido tratando los lodos procedentes de sus estaciones regeneradoras de aguas

residuales con técnicas de secado térmico por cogeneración energética mediante un turbogenerador. (De Castro, 2004).

Este lodo fue añadido a los campos de ensayo en las campañas 2005-2006 y 2007-2008 y en tabla 2 se muestran las características químicas del lodo empleado (media de dos años 2005 y 2007). Los métodos utilizados para sus análisis son los mismos que los expuestos para el suelo.

Análisis estadístico

En cada experimento los tratamientos se replicaron tres veces y se distribuyeron al azar. Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza de múltiple rango (ANOVA) y prueba estadística LSD para comparar su media ($P \leq 0,05$), utilizando el programa estadístico Statgraphics (SAS Institute Inc.1999).

Resultados y discusión

Evolución de las propiedades químicas del suelo

pH

El pH del suelo se encuentra entre los factores más importantes capaces de condicionar los procesos que tiene lugar en el mismo, ya que afecta a sus diversas propiedades y su comportamiento, como movilidad y biodisponibilidad de elementos tóxicos, disponibilidad de nutrientes, dinámica de la materia orgánica, poblaciones microbiológicas, fijación de nitrógeno etc (Ojeda et al., 2010).

La figura 1 muestra la evolución del pH en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo) observándose que la adición de lodos térmicos provocó un aumento del pH en

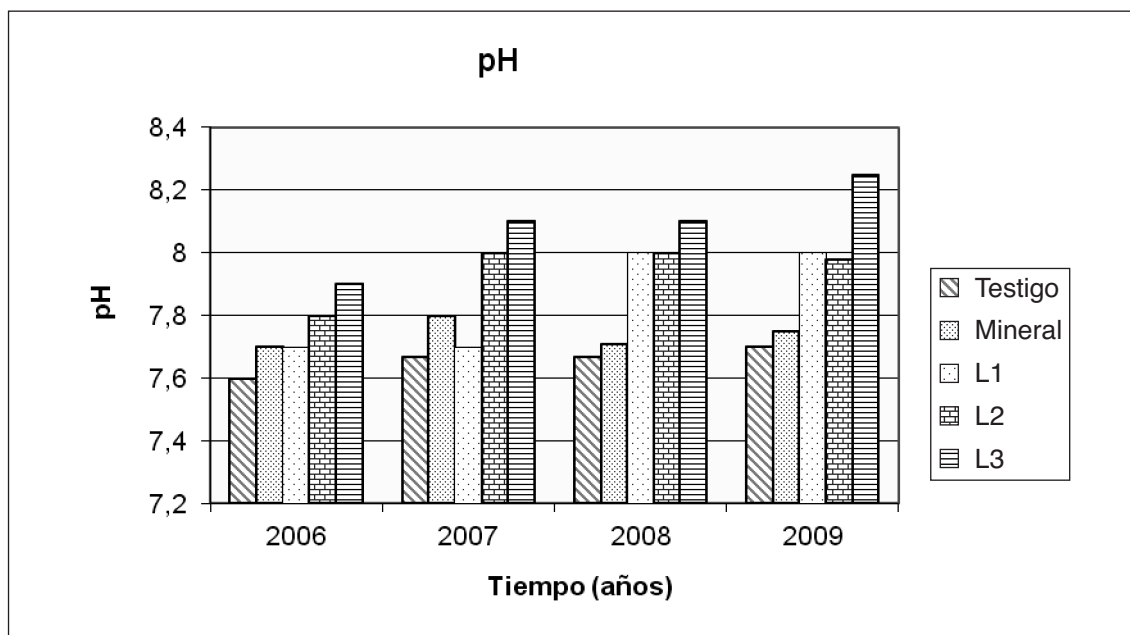


Figura 1. Evolución del pH en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 1. Evolution of pH in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

los suelos fertilizados con dosis altas con respecto al control y a la fertilización mineral.

Como consecuencia del incremento de pH del suelo obtenido tras la adición de lodo secado térmicamente, se mejora la fertilidad del suelo, ya que aumenta la disponibilidad para la planta de los nutrientes (Whalen et al., 2002), y se reduce la solubilidad de otros elementos fitotóxicos, como el aluminio soluble o intercambiable (Haynes y Mokolobate, 2001), aumentando el rendimiento del cultivo (Liu et al., 2004)

Conductividad eléctrica

Debido a que el lodo secado térmicamente presenta una elevada concentración de sales (Ojeda et al., 2010), la aplicación de este residuo conlleva un mayor riesgo de salinización de los suelos cuando se incorpora de manera

continuada, especialmente en las condiciones semiáridas en las que se desarrolla este estudio, ya que el lavado de sales está limitado por la escasez de lluvias y la elevada evapotranspiración (Camilla y Jordán, 2009).

La figura 2 muestra la evolución de la conductividad eléctrica en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo) observándose que los suelos que han recibido dosis más altas de lodo han registrado un incremento de la conductividad eléctrica debido a la gran cantidad de sales aportadas por el residuo (Fernández et al., 2009).

Evolución del estado nutricional

Con el fin de satisfacer los requerimientos nutricionales de los cultivos se ha estudiado la

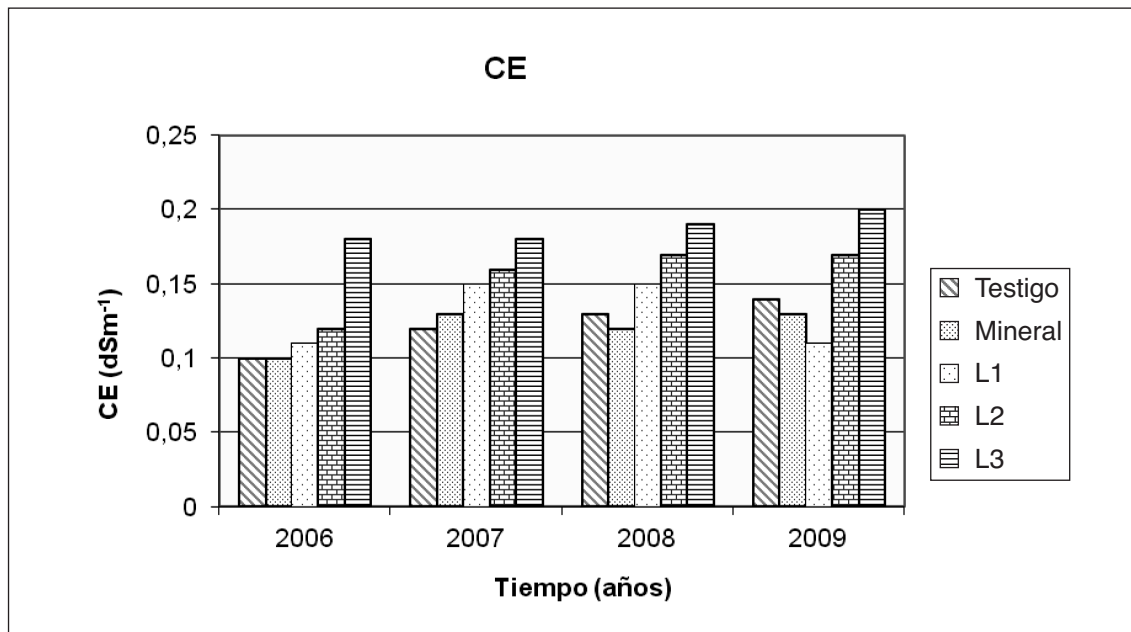


Figura 2. Evolución de la CE en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 2. Evolution of CE in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

evolución del nitrógeno los nutrientes N, P, K, Ca, Mg y Na, en especial de los tres primeros por ser considerados los nutrientes fundamentales para las plantas. La presencia de todos ellos mejora las propiedades químicas y físicas del suelo y la producción del cultivo (Moussa-Machraoui et al., 2010).

La evolución del contenido de nitrógeno en el suelo experimentó un ligero aumento en el año 2008 (figura 3) pero un descenso en el 2009 a pesar de la elevada cantidad de nitrógeno aportada por las sucesivas incorporaciones de lodo secado térmicamente, debido principalmente a las pérdidas de N por: la absorción por el cultivo, volatilización de amonio, lixiviación de nitratos o por desnitrificación (Aparicio, 2009).

En cuanto al fósforo (P) los lodos térmicos contienen cantidades significativas de este ele-

mento, gracias a que en el proceso de secado se produce una concentración de éste y otros nutrientes, lo que hace que sea uno de los elementos fertilizantes más valorados en su utilización agronómica (Mosquera-Losada et al., 2010). La evolución del P asimilable en los suelos enmendados con lodos térmicos muestra un aumento con respecto a los controles, aunque no es muy apreciable (figura 4).

Los contenidos de K asimilable en los suelos no varían con la adición de la enmienda orgánica (figura 5), ya que los lodos no son considerados una fuente importante de este elemento (Singh y Agrawal, 2008), aunque su disponibilidad es elevada para las plantas al encontrarse en formas inorgánicas muy solubles (Mosquera-Losada et al., 2010).

En las figuras 6 y 7 se muestran la evolución de las fracciones asimilables de Ca, y Mg. Ob-

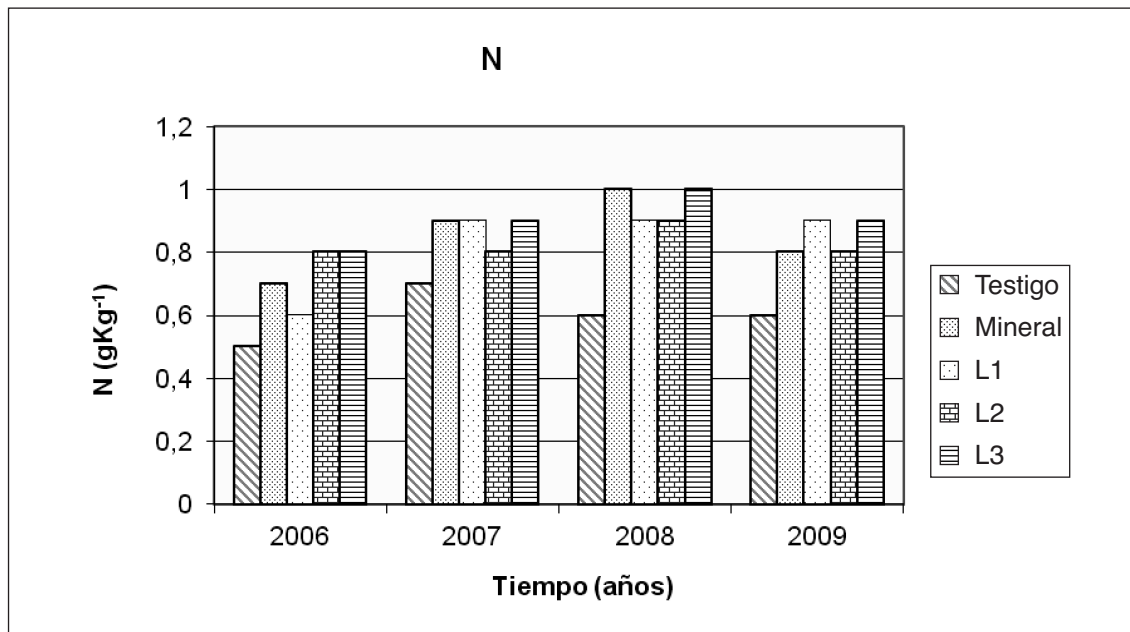


Figura 3. Evolución del N en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo) .
 Figure 3. Evolution of N in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

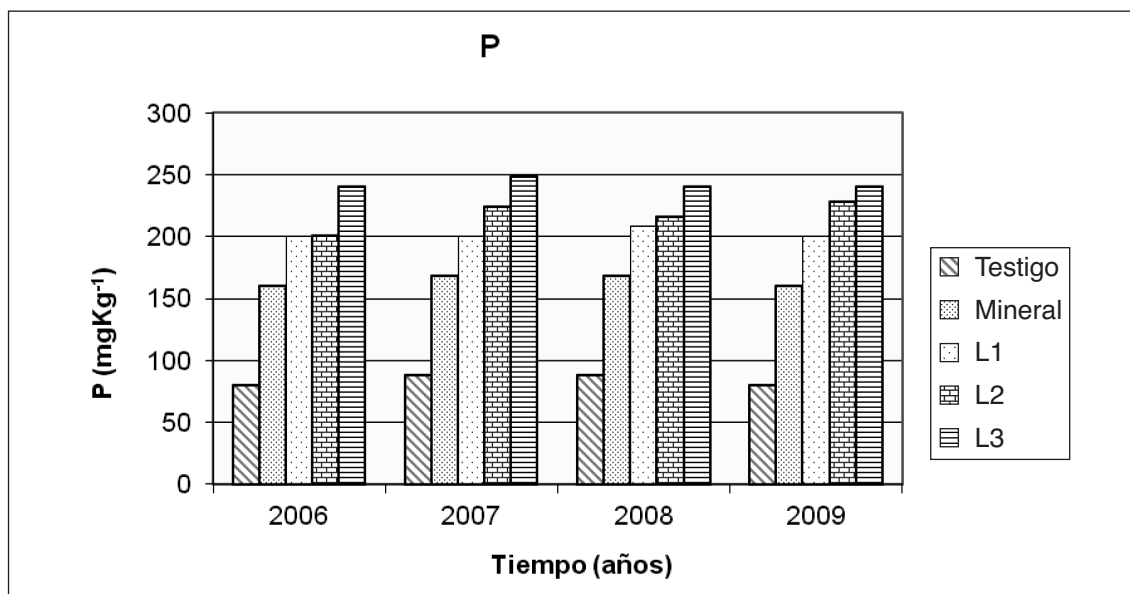


Figura 4. Evolución del P en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo) .
 Figure 4. Evolution of P in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

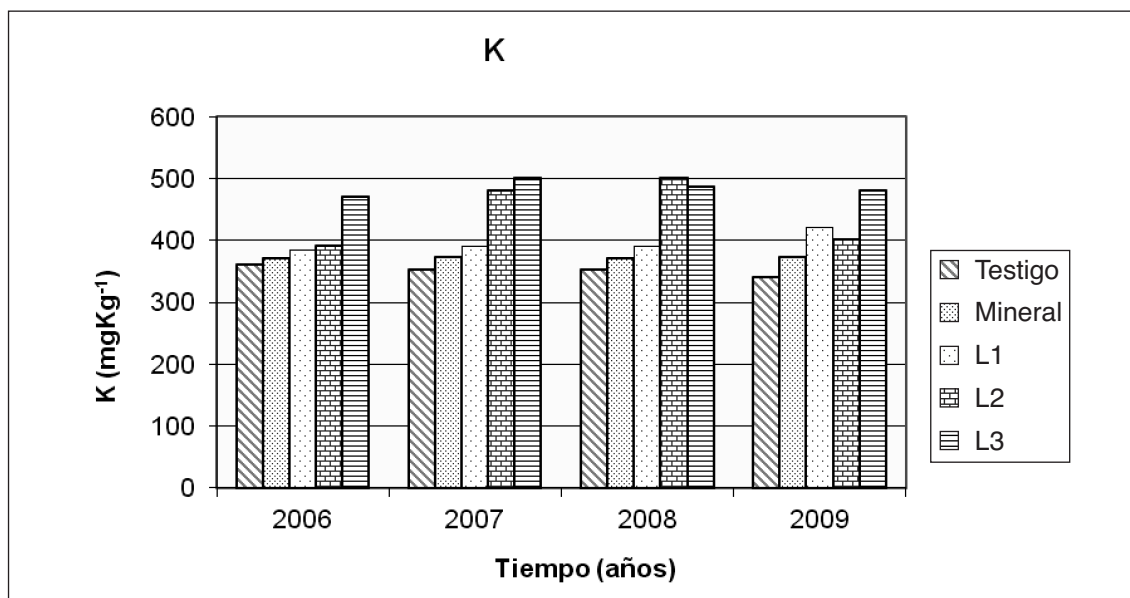


Figura 5. Evolución del K en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 5. Evolution of K in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

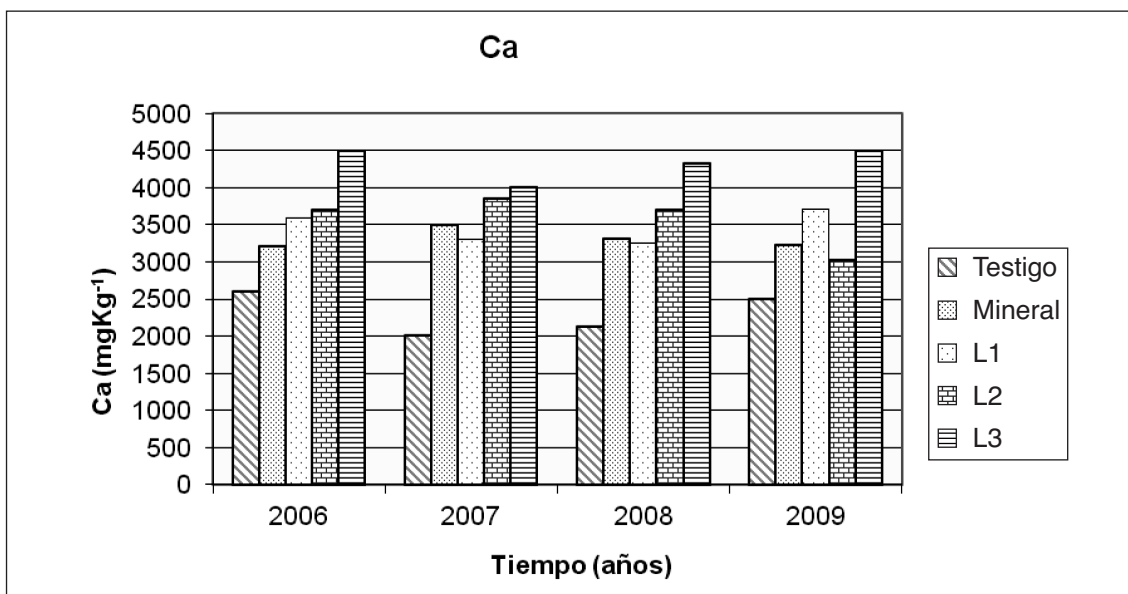


Figura 6. Evolución del Ca en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 6. Evolution of Ca in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

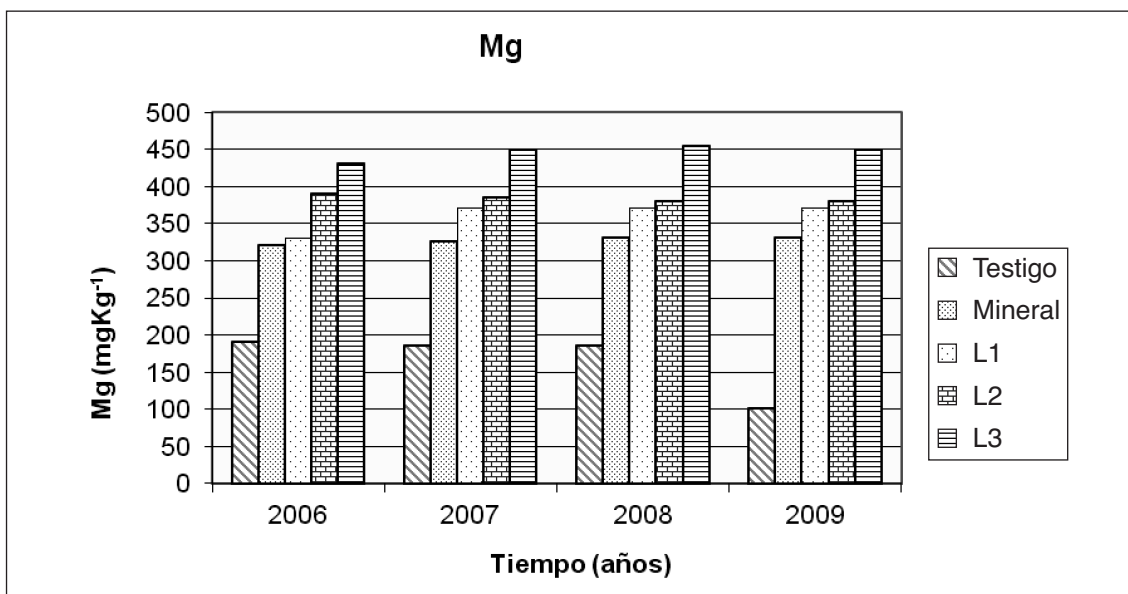


Figura 7. Evolución del Mg en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 7. Evolution of Mg in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

servándose que en general, la aplicación de lodos térmicos provoca un incremento de estos elementos en los suelos enmendados con respecto a los controles, lo cual concuerda con lo obtenido por Singh y Agrawal (2008) en estudios previos con este tipo de enmienda orgánica.

En cuanto al contenido en micronutrientes Cu, Zn y Ni (figuras 8, 9, y 10) se puede comprobar como la aplicación de lodos secados térmicamente aumenta, generalmente los contenidos en suelo de estos elementos; sin embargo, cabe destacar que en ningún caso se superan los límites establecidos en el R.D. 1310/1990 (BOE 262, 1990) que regula la utilización de lodos de depuradora en sistemas agrario. Los metales pesados Cr, Cd y Pb también fueron analizados encontrándose por debajo de los límites de detección (<0,20).

Evolución del carbono orgánico

La figura 11 presenta la evolución de los contenidos de carbono orgánico total en el suelo en los cuatro años objeto de estudio. La adición de lodo térmico provoca en general un aumento del C orgánico total en los suelos y una ligera disminución con el tiempo debido principalmente al proceso industrial de secado térmico del lodo en el que no se produce una estabilización biológica (Mosquera-Lozada *et al.*, 2010), este tipo de materiales aportan gran cantidad de C orgánico, fracciones lábiles de C y una biomasa microbiana muy activa que hace que la tasa de mineralización, una vez incorporada a los suelos, sea mayor en las primeras etapas. Resultados similares han sido observados por Tarrasón *et al.* (2008) y Fernández *et al.* (2009) con este tipo de lodo en condiciones semiáridas.

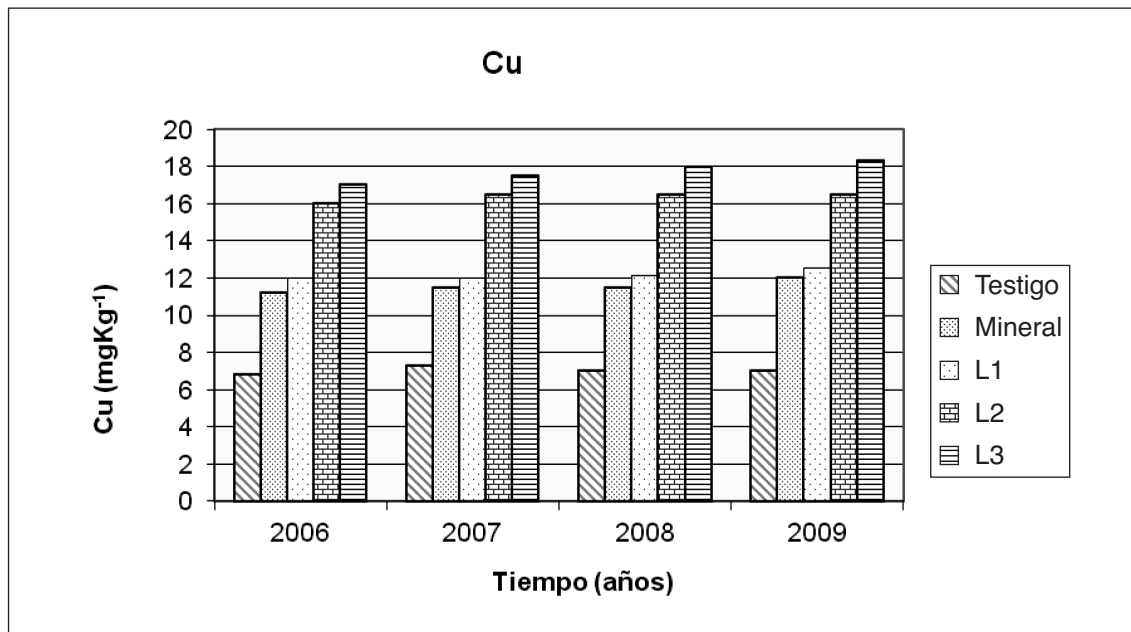


Figura 8. Evolución del Cu en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 8. Evolution of Cu in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

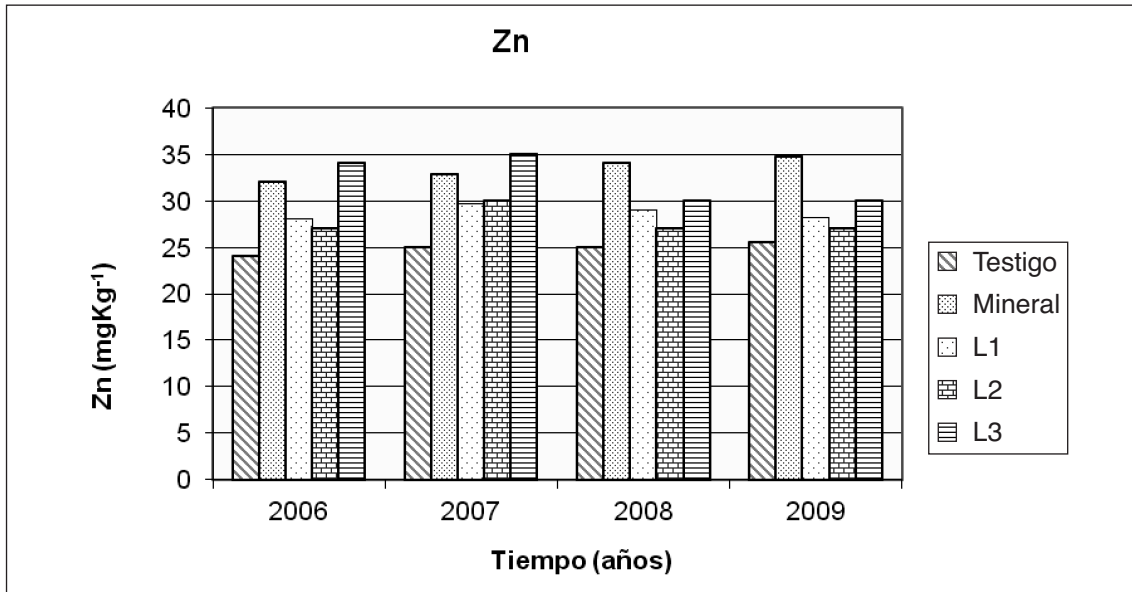


Figura 9. Evolución del Zn en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 9. Evolution of Zn in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

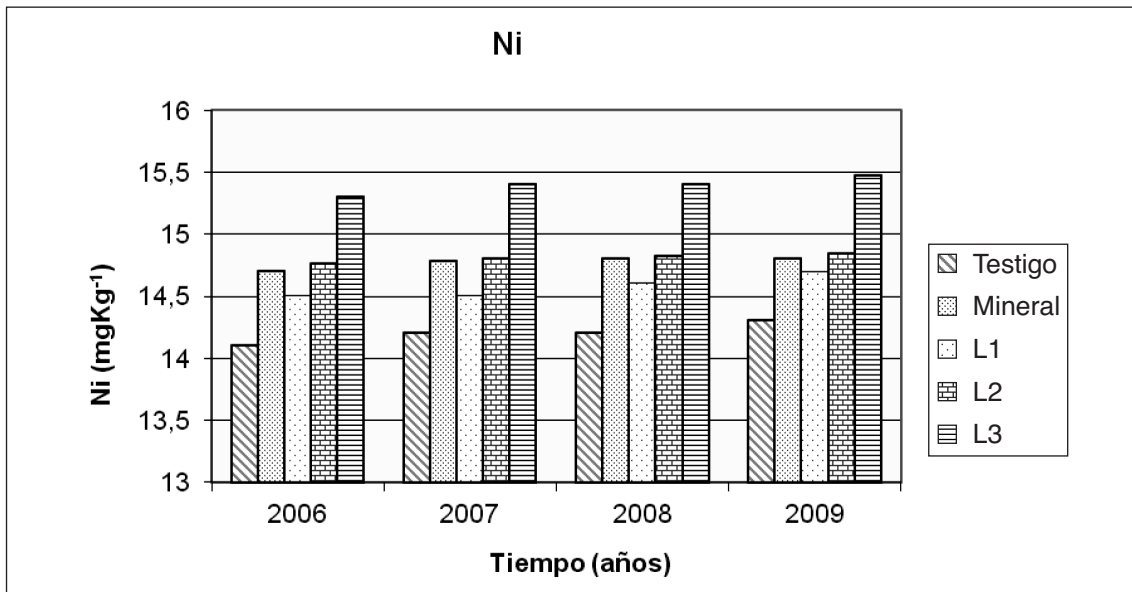


Figura 10. Evolución del Ni en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 10. Evolution of Ni in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

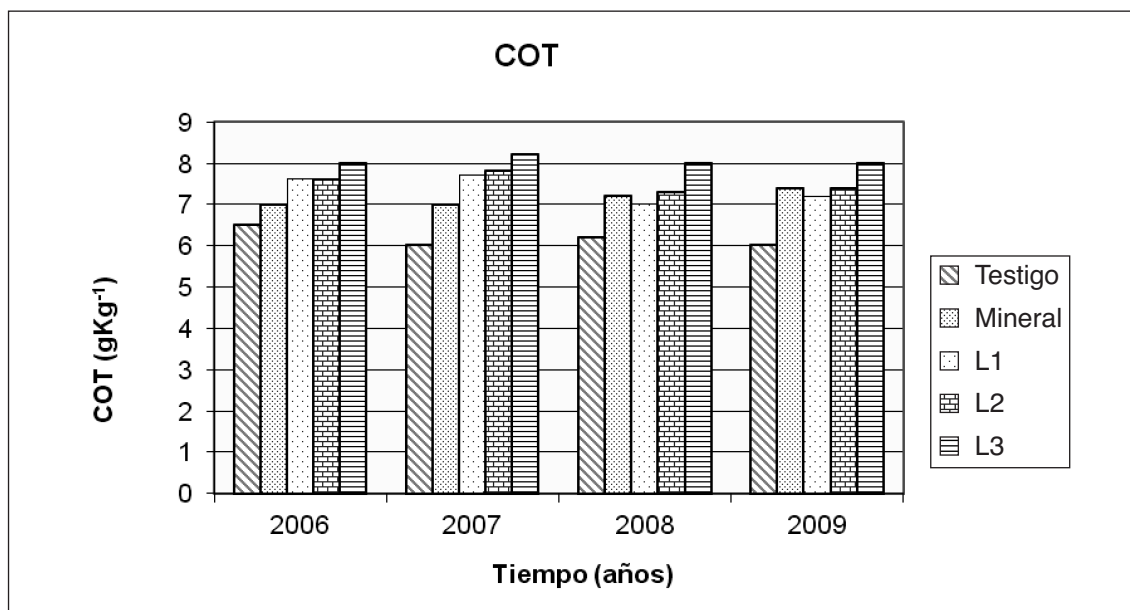


Figura 11. Evolución del COT en el suelo control, mineral y en suelos enmendados con lodo secado térmicamente (media de los tres cultivos cebada, avena y trigo).
 Figure 11. Evolution of COT in the control soil, mineral and thermally dried sewage sludge amended soils (average of three crops barley, oat and wheat).

Finalmente para estudiar el comportamiento de la incorporación de los lodos en los diferentes cultivos de cereal se diseñaron las tablas 3, 4 y 5 (media de cuatro años de ensayo de campo en cada uno de los cultivos cebada, avena y trigo respectivamente) en las que se reflejan las propiedades químicas del suelo en los diferentes tratamientos.

En todos ellos se puede observar un aumento en casi todos los parámetros estudiados cuando los suelos fueron fertilizados con lodo de depuradora, debido al aporte de nutrientes y materia orgánica (Delgado *et al.*, 2012).

En el cultivo de cebada se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para todos los parámetros estudiados excepto el pH, nitrógeno total y metales pesados, cadmio, plomo y cromo (Cd, Pb y Cr).

En el caso del cultivo de avena y trigo (tabla 4 y 5) existen diferencias significativas en to-

dos los parámetros estudiados excepto en la conductividad eléctrica y los metales pesados cadmio, plomo y cromo (Cd, Pb y Cr).

Conclusiones

El estudio realizado sobre el comportamiento del suelo de tres cultivos de cereal cuando se aplicó lodo secado térmicamente dio como resultado que:

- En todos los tratamientos estudiados donde el suelo fue enmendado con lodo se mejoró su fertilidad y el contenido en materia orgánica.
- La concentración de metales pesados en el suelo fue incrementada con la incorporación del lodo pero sin que existieran riesgos apreciables de contaminación.

Tabla 3. Características químicas del suelo de cebada en los diferentes tratamientos (media de cuatro años)
 Table 3. *Chemical characteristics of barley soil according to the different treatments (average of four years)*

Tratamiento	pH	C.E. dSm ⁻¹	COT. gkg ⁻¹	NT gkg ⁻¹	P*	K*	Ca*	Mg*	Zn*	Cu*	Ni*	Cd, Pb Cr*
Testigo	7,67a	0,13a	6,75a	0,8a	80,04a	357,7e	2600,4c	187,5c	24,0b	6,8b	14,1d	< 0,2a
Mineral	7,71a	0,13ab	7,74a	1,0a	165,05a	369,8b	3146,9d	302,3d	35,1a	7,4a	14,7a	< 0,2a
L1	7,71a	0,15a	7,88ab	0,9a	200,05a	420,4d	3587,4e	324,7e	29,2d	7,0c	14,8b	< 0,2a
L2	7,78a	0,17a	7,93ab	0,9a	225,06b	500,0a	3784,5a	387,47b	28,5c	16,0d	14,7c	< 0,2a
L3	7,90a	0,19b	8,0b	1,0a	248,06b	478,7c	4547,5b	450,4a	35,3e	17,0e	15,4e	< 0,2a
Valor p	ns	*	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	ns

*mgkg⁻¹ Notas: *p<0,05 significativo. ns; no significativo (p>0,05).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD (p<0,05).

Tabla 4. Características químicas del suelo de avena en los diferentes tratamientos (media de cuatro años)
 Table 4. *Chemical characteristics of oat soil according to the different treatments (average of four years)*

Tratamiento	pH	C.E. dSm ⁻¹	COT. gkg ⁻¹	NT gkg ⁻¹	P*	K*	Ca*	Mg*	Zn*	Cu*	Ni*	Cd, Pb Cr*
Testigo	7,66a	0,14a	5,78a	0,6ba	88,04a	360,8e	2326,0c	198,5c	22,52b	7,2d	14,2b	< 0,2a
Mineral	7,81ab	0,14a	5,91ab	0,7b	170,04a	372,0d	3546,5e	305,6e	32,00c	7,6c	14,2b	< 0,2a
L1	7,85ab	0,15a	6,94ab	0,6a	200,05b	384,4b	3554,0a	350,4a	28,58d	7,0b	14,4a	< 0,2a
L2	8,00b	0,15a	6,94ab	0,8b	224,05b	478,1a	3800,2b	380,4b	27,12a	15,8d	14,4c	< 0,2a
L3	8,09	0,16a	7,99ab	0,8b	247,06a	500,4c	4214,6d	425,6d	30,54e	17,2e	15,7c	< 0,2a
Valor p	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns

*mgkg⁻¹ Notas: *p<0,05 significativo. ns; no significativo (p>0,05).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD (p<0,05).

Tabla 5. Características químicas del suelo de trigo en los diferentes tratamientos (media de cuatro años)
 Table 5. Chemical characteristics of wheat soil according to the different treatments (average of four years)

Tratamiento	pH	C.E. dSm ⁻¹	COT. gkg ⁻¹	NT gkg ⁻¹	P*	K*	Ca*	Mg*	Zn*	Cu*	Ni*	Cd, Pb Cr*
Testigo	7,70a	0,10a	6,68a	0,8a	85,0a	361,8b	2143,1a	187,3a	24,7a	7,0a	14,0a	< 0,2a
Mineral	7,91b	0,10a	6,66a	0,9a	170,0a	374,4a	3540,6c	330,4b	32,4b	7,4b	14,5b	< 0,2a
L1	8,05bc	0,11a	7,73ab	0,9a	200,0ab	390,4c	3547,7d	350,4c	28,6c	7,1c	14,6b	< 0,2a
L2	8,09bc	0,11a	7,73ab	0,8b	227,6ab	472,74e	3474,7e	398,5e	27,3d	16,2d	14,6c	< 0,2a
L3	8,18c	0,12a	8,20b	1,0ab	249,8ab	480,7b	4523,4b	431,4d	34,4e	17,8e	15,3d	< 0,2a
Valor p	*	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ns

*mgkg⁻¹ Notas: *p<0,05 significativo. ns; no significativo (p>0,05).

Valores seguidos de la misma letra en la misma columna no difieren significativamente según el test de LSD (p<0,05).

Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias al proyecto RTA2008-00040-00-00 financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA-FEDER). Los autores agradecen a Jesús García, María Isabel González y Ángela García por su colaboración en las tareas de campo y laboratorio.

Bibliografía

- Antolín MC, Pascual I, García C, Polo A, Sánchez-Díaz M, 2005. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 94: 224-237.
- Aparicio I, Santos JL, Alonso E, 2009. Limitation of the concentration of organic pollutants in sewage sludge for agricultural purpose: A case study in South Spain. *Waste Management*, 29: 1747-1753.
- APHA, AWWA, WPCF, 2005. *Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*. 21st ed. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, 874 p.
- B.O.E. 262, de 1 de noviembre 1990. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.
- Camilla S, Jordán MM, 2009. Electrical conductivity measurements in sewage sludge pellets: Innovative techniques for environmental management. *Journal of Hazardous Materials*, 168: 1260-1263.
- De Castro J, 2004. El secado térmico de los lodos de depuración. *Tecnoambiente*, 142: 27-32.
- Delgado M, Martín JV, Rodríguez C, Miralles de Imperia R, 2012. Evaluación de un lodo secado térmicamente en la fertilización de cultivo de cereal. *ITEA*, 108: 357-375.
- Fernández JM, Senesi N, Plaza C, Brunetti G, Polo A, 2009. Effects of composted and thermally-dried sewage sludges on soil and soil humic acid properties. *Pedosphere* 19: 281-291.

- Haynes RJ, Mokolobate, 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 59: 47-63.
- Hesse PR, 1971. Total nitrogen: the Kjeldahl Process. A Textbook of soil chemical analysis. Murray, Gran Bretaña. 520 p.
- Liu DL, Helyar KR, Conyers MK, Fisher R, Poile GL, 2004. Response of wheat, triticale and barley to lime application in semi-arid soils. *Field Crop Res.* 90: 287-301.
- MAPA, 1994. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Métodos Oficiales de Análisis. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. Tomo III, 662 p.
- Mandal A., Patra AK., Singh D., Swarup A, Mastro RE, 2007. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages. *Bioresource Technology*, 98: 3585-3592.
- MMA, 2006. Ministerio de Medio Ambiente: II Plan Nacional de lodos de depuradora de aguas residuales-EDAR IIPNLD (2008-2015). Plan nacional integrado de residuos (PNIR).
- Mosquera-Losada MR, Muñoz-Ferreiro N, Rigueiro-Rodríguez A, 2010. Agronomic characterization of different types of sewage sludge: Policy implications. *Waste Management.* 30: 492-503.
- Moussa-Machraoui S.B, Errouissi F, Ben-Hammouda M, Nouira S, 2010. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil and Tillage Research.* 106: 247-253.
- Ojeda G, Mattana S, Alcañiz JM, Marando G, Bonmatí M, Woche SK, Bachmann J, 2010. Wetting and soil water retention of a minesoil amended with composted and thermally dried sludges. *Geoderma* 156: 399-409.
- Pedra F, Polo A, Ribeiro A, Domingues H, 2007. Effects of municipal soil waste compost and sewage sludge on mineralization of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 39: 1375-1382.
- Plaza C, Hernández D, Fernández JM, Polo A, 2006. Long-term effects of amendment with liquid swine manure on proton binding behavior of soil humic substances. *Chemosphere* 65: 1321-1329.
- Ramírez WA, Domene X, Ortiz O, Alcañiz JM, 2008. Toxic effects of digested, composted and thermally-dried sewage sludge on three plants. *Bioresource Technology*, 99: 7168-7175.
- Rodríguez JA, López M, Grau JM, 2009. Metales Pesados, Materia Orgánica y otros Parámetros de los Suelos Agrícolas y Pastos de España. Ed. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. 221 p.
- Romanyà J, Rovira P, Vallejo R, 2007. Análisis del carbón en los suelos agrícolas de España. Aspectos relevantes en relación a la reconversión a la agricultura ecológica en el ámbito mediterráneo. *Ecosistemas*, 16: 1-8.
- SAS Institute Inc. 1999. *User's guide*. Cary, North Carolina, 891-996.
- Saviozzi A, Biasci A, Riffaldi R, Levi-Minzi R, 1999. Long-term effects of farmyard manure and sewage sludge on some soil biochemical characteristics. *Biology and Fertility of Soils*, 30: 100-106.
- Sims JT, Kline JS, 1991. Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge. *Journal Environmental Quality*, 20: 387-395.
- Singh RP, Agrawal M, 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28: 347-358.
- Tarrasón D, Ojeda G, Ortiz O, Alcañiz JM, 2008. Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge. *Bioresource Technology*, 99: 252-259.
- Whalen JK, Chang C, Clayton GW, 2002. Cattle manure and lime amendments to improve crop production of cattle of acid soils in northern Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 82: 227-238.

(Aceptado para publicación el 9 de noviembre de 2012)