

Uso potencial de los lodos urbanos en la producción agrícola

Gilsanz Juan Carlos,¹ Leoni Carolina¹, Schelotto Felipe², Acuña Ana³

¹INIA Las Brujas, Programa Nacional de Producción y Sustentabilidad Ambiental. Ruta 48 km 10, Rincón del Colorado, 92000 Canelones, Uruguay. Correo electrónico: jgilsanz@inia.org.uy

²Departamento de Bacteriología y Virología, Instituto de Higiene, Facultad de Medicina, Universidad de la República. Av. Dr. Alfredo Navarro 3051, 11600 Montevideo, Uruguay.

³Departamento de Parasitología, Instituto de Higiene, Facultad de Medicina, Universidad de la República. Av. Dr. Alfredo Navarro 3051, 11600 Montevideo, Uruguay.

Recibido: 9/4/12 Aceptado: 31/7/13

Resumen

En los sistemas de producción agropecuaria se recomienda la incorporación de materia orgánica para minimizar la degradación del recurso suelo. Los desechos orgánicos provenientes de plantas de tratamiento de líquidos residuales domésticos (PTARD), denominados lodos urbanos, constituyen una fuente de materia orgánica con potencial uso agrícola. El presente trabajo planteó evaluar el uso de lodos urbanos como enmienda orgánica en cultivos y determinar la posible contaminación de cultivos y suelo con patógenos humanos presentes en los lodos. Durante seis ciclos con lechuga, se comparó la productividad y nivel de nitratos en hoja luego del agregado de lodos urbanos frescos y compostados, cama de pollo y fertilización química (en base a igual aporte de N). Solo en un ciclo los rendimientos fueron menores que la fertilización química y los niveles de nitratos en hojas nunca superaron los máximos permitidos. No se observó contaminación por patógenos ni en los vegetales cultivados ni en el suelo con los lodos empleados. A su vez en 13 partidas de lodos frescos analizadas el nivel de coliformes fecales fue altamente variable, en siete se detectaron bacterias del género *Salmonella*, y en una huevos de helmintos. Los resultados indican la potencialidad de los lodos urbanos compostados como enmienda orgánica. Sin embargo la seguridad de su empleo en la producción de alimentos dependerá de la carga de patógenos humanos y de factores no analizados en el presente trabajo como carga de metales pesados y tiempo de espera luego de su aplicación.

Palabras clave: biosólidos, producción hortícola, nitratos, patógenos humanos

Summary

Potential Uses of Sewage Sludge in Agricultural Production

In agricultural systems, soil amendments with organic matter are advised in order to minimize soil degradation. The organic matter originated at the household wastewater treatment facilities (PTARD) called sewage sludge originated at household wastewater treatment facilities (PTARD), called urban sludge, is a potential source of organic matter for agricultural use. In this work we aimed to evaluate the agronomic potential of domestic sewage sludge to be used as soil organic amendment in crop production and to evaluate the risk of crop and soil contamination with human pathogens. Along six lettuce crop cycles we compared the productivity and leaf tissue nitrate content where fresh and composted sewage sludge, chicken bed and chemical fertilizers were applied, all with an equal supply of N. In only one cropping cycle lettuce yields were lower than with chemical fertilization, and leaf tissue nitrates were always within the maximum thresholds allowed. No contamination of soil and lettuce leaves with human pathogens was detected. Among the 13 sewage sludge samples analyzed, fecal coliforms levels were highly variable, bacteria belonging to *Salmonella* genus were detected in seven samples and helminthes eggs were found in only one sample. The results indicate the potential of composted urban sludge as organic amendment. Nevertheless, the safe use of sewage sludge in food production will also depend on its levels of human pathogens and on other factors not analyzed in the present work, like the level of heavy metals and the time interval between application and crop harvest.

Keywords: biosolids, vegetable production, nitrates, human pathogens

Introducción

En la mayoría de los sistemas de producción agropecuaria del Uruguay se detectan problemas de degradación de los recursos naturales. Los suelos sometidos a sistemas de agricultura continua pierden su capacidad productiva, principalmente por la reducción de su contenido de materia orgánica (MO) a razón de un 1 a 4 % anual (García de Souza *et al.*, 2011). A nivel nacional, en sistemas agrícola-cerealeros después de 28 años de agricultura continua se han estimado pérdidas del 23% de MO respecto a su contenido inicial en el suelo (Díaz, 1994) atribuidas fundamentalmente a la erosión hídrica. En sistemas hortícolas las pérdidas variaron entre 31 y 44% para brunosoles arcillosos y limosos, respectivamente, comparando zonas de suelo imperturbado y cultivado (García de Souza *et al.*, 2011). La materia orgánica es esencial para el mantenimiento de la salud del suelo, entendida como la capacidad de sostener la producción de fibras y alimentos en niveles de calidad y cantidad suficientes para satisfacer las demandas humanas y asegurar la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para el mantenimiento de la calidad de vida y la conservación de la biodiversidad (Kibbelwhite *et al.*, 2008).

Una estrategia para minimizar la degradación de los suelos, es la incorporación de materia orgánica producida dentro o fuera de los predios. Desechos orgánicos provenientes de plantas de tratamiento de líquidos residuales domésticos (PTARD), denominados barros urbanos, lodos urbanos o biosólidos constituyen una fuente de materia orgánica con potencial uso agrícola. La utilización de lodos urbanos en suelos agrícolas está siendo evaluada desde 1925 en países como Holanda, Dinamarca, USA y el Reino Unido, donde cerca del 45% del barro de efluentes es aprovechado en la agricultura (Kirkham, 1982). La aplicación en la producción agropecuaria de los lodos urbanos, provee numerosos beneficios como acondicionador físico del suelo mejorando la porosidad y la infiltración y el aumento de la resistencia a la erosión (Jorge *et al.*, 1991; Marciano, 1999); como aporte de macro y micro nutrientes y de materia orgánica; contribuyendo a mejorar las propiedades químicas (pH, capacidad de intercambio catiónico, etc.) y biológicas (incremento de la actividad microbiana) del suelo (dos Santos y Bettiol, 2003; Leoni y Ghini, 2006). Sin embargo, el manejo de los excesos de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, es esencial para evitar la contaminación ambiental de los cursos de agua y minimizar los altos niveles de nitratos en tejidos vegetales, particularmente en los

cultivos de hojas como lechugas y espinacas (Merino y Ansorena, 1993).

Asimismo, es necesario tener en cuenta aspectos de salud humana que incluyen: patógenos, bioaerosoles, metales pesados y tóxicos orgánicos. La calidad final de los lodos urbanos, dependerá del origen de los materiales (residencial, industrial) y del tratamiento que estos reciban: digestión aerobia, compostaje, estabilización con cal, radiación con rayos gama, pasteurización, etc. (Bettiol y Camargo 2006; Epstein, 1998; Ozores-Hampton y Peach, 2002). Los lodos urbanos pueden ser empleados como mejoradores de suelo en sistemas agrícolas si presentan niveles de patógenos humanos y metales pesados debajo de los máximos admitidos. En particular, para patógenos humanos las normas internacionales establecen niveles de *Escherichia coli* < 1000 NMP/g materia seca (MS); *Salmonella* < 3 NMP/4 g MS, huevos de helmintos < 1/4 g MS (Argentina. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2001; Fernandez, 2000; Ozores-Hampton y Peach, 2002; Strauss, 2000).

En Uruguay, se constata un incremento en los volúmenes de lodos urbanos generados en las PTARD dado que Obras Sanitarias del Estado (OSE) gestiona en diferentes localidades del país en el marco del Plan Nacional de Agua Potable y Alcantarillado (Contrato de Préstamo BID 785/OC-UR) y del Proyecto de Modernización y Rehabilitación de OSE (Préstamo BM 4556-UR). Con los nuevos tratamientos se ha mejorado la calidad de los vertidos, pero ha surgido el problema del manejo y disposición final de los barros. El lodo con disposición final inadecuada, contamina los recursos naturales alterando sus características físicas, químicas y biológicas, constituyendo una amenaza para la salud pública y ambiental, además de un problema estético. Por ello, la adecuada gestión de los lodos desde su origen, su tratamiento y destino final, no es solamente deseable, sino más que necesario para la sociedad.

El presente trabajo se planteó: 1. evaluar el potencial agronómico de los lodos obtenidos en las plantas de tratamiento de líquidos residuales domésticos (PTARD) de OSE para su aplicación directa como enmienda orgánica en cultivos, 2. evaluar la carga de patógenos humanos en diferentes partidas de lodos urbanos, y 3. evaluar si hay contaminación microbiológica de los cultivos y del suelo luego del agregado de lodos urbanos.

Materiales y métodos

Los experimentos se realizaron en la Estación Experimental INIA Las Brujas (Rincón del Colorado, Canelones,

Uruguay), sobre un suelo Brunosol eútrico típico, limo arcilloso de la formación Libertad-Fray Bentos (Altamirano *et al.*, 1976), durante las temporadas 2005-06 y 2006-07.

El cultivo de lechuga se eligió por su sensibilidad a la contaminación por nitratos y microbiológica, por su corto ciclo y porte rastrero. Se evaluaron dos ciclos anuales de producción (primavera-verano y otoño-invierno), debido al efecto de la temperatura sobre el desarrollo de las plantas y la mineralización de las enmiendas orgánicas. Se compararon dos manejos, con y sin mulch plástico (polietileno negro, densidad de 25 micrones), por el efecto del mulch en la mineralización de las enmiendas orgánicas y por su acción como barrera física ante la contaminación microbiológica del cultivo.

Las variedades se seleccionaron de acuerdo a los ciclos productivos (Cuadro 1). La densidad de siembra fue de 53600 pl/ha. Los volúmenes de las enmiendas orgánicas y fertilización química variaron con los ciclos, y se cal-

cularon de forma de aportar 100 Unidades de N al cultivo (Cuadro 2). Las enmiendas orgánicas se aplicaron dos veces por año, representando una aplicación cada dos ciclos de lechuga. Los lodos urbanos se obtuvieron en la planta de tratamiento de líquidos residuales domésticos de OSE de la ciudad de Florida, Uruguay, por aireación extendida y deshidratación por filtro de bandas. La cama de pollo se obtuvo de una granja avícola luego de la cría de tres generaciones de pollos, y se estacionó a campo por tres meses.

Se realizaron seis tratamientos: T1- agregado de lodo fresco, T2- agregado de lodo fresco y suelo cubierto con mulch plástico, T3- agregado de una mezcla de lodo fresco y cáscara de arroz, estacionado a campo (Lodo «compostado»), T4- agregado de abono de pollo, T5- agregado de abono de pollo y suelo cubierto con mulch plástico, T6- fertilización química (manejo convencional). El tratamiento asignado a cada parcela se mantuvo durante los dos años,

Cuadro 1. Variedades empleadas, fechas de transplante y cosecha, y temperaturas medias registradas durante el cultivo de lechuga, para cada ciclo evaluado.

Ciclo y cultivar	Transplante ¹	Cosecha	Temperatura media del aire (°C)		
			Máxima	Mínima	Media
C1 - Justine	20/12/2005	23/01/2006	28,4	15,3	21,7
C2 - Justine	8-10/02/2006	15/03/2006	27,4	15,3	21,1
C3 - Sunstar	06/06/2006	16/09/2006	17,0	6,9	11,7
C4 - Sunstar	12/10/2006	28/11/2006	25,1	11,9	17,7
C5 - Nancy	18/12/2006	25/01/2007	28,9	16,7	22,7
C6 - Nancy	10/02/2007	21/03/2007	27,4	16,4	21,4

¹Trasplante de plantines con cuatro hojas verdaderas.

Cuadro 2. Enmiendas orgánicas y fertilizante aplicados en el cultivo de lechuga en los diferentes ciclos de cultivo (en kg/hectárea). Las enmiendas se realizaron de forma de proporcionar 100 unidades de nitrógeno al cultivo.

	Ver 05-06	Inv 06	Ver 06-07
Lodo fresco	5941	41540	1340
Lodo "compostado" ¹	11167	17331	20100
Cama de pollo ²	7593	42657	2680
Fertilizante químico ³	146	371	146

¹Lodo "compostado": mezcla de lodo fresco y cáscara de arroz, estacionado a campo.

²Cama de pollo: mezcla de cáscara de arroz y heces producidas durante la cría de pollos en confinamiento, y estacionado a campo por tres meses.

³Urea.

para ver el efecto acumulativo de la aplicación de los lodos. El diseño experimental fue de bloques en parcelas al azar con cuatro repeticiones. El tamaño de la parcela fue de 25 m² (5 m x 5 m) y una distancia de calles entre parcelas de 3 m.

Análisis químicos de suelos y enmiendas orgánicas

Las muestras de suelos y enmiendas orgánicas se colectaron, se secaron a temperatura ambiente y se enviaron al Laboratorio de Suelos de INIA La Estanzuela para su análisis. En diciembre de 2005 se realizó un análisis de suelos del sitio experimental, y luego se realizaron análisis de las enmiendas antes de su utilización y de cada una de las parcelas evaluadas al fin de cada ciclo de cultivo (Cuadro 3).

En todos los casos, el Carbono orgánico (C-org) se determinó mediante la técnica de combustión a 900 °C y posterior detección de CO₂ por infrarrojo; el P Bray I por extracción y colorimetría; nitratos (N-NO₃) por extracción en CuSO₄ y potenciometría; amonio (N-NH₄) por extracción en KCl y colorimetría; nitrógeno total por combustión a 900 °C y posterior detección de N₂ por conductividad térmica; potasio (K) y sodio (Na) por extracción en acetato de amonio a pH 7 y emisión atómica; conductividad eléctrica (CE) (relación 1:1 suelo:agua, conductímetro); pH en agua (relación 1:2,5 suelo:agua, potenciómetro).

Análisis microbiológicos de suelos y planta

Las poblaciones de coliformes totales, coliformes fecales, *Salmonella* y helmintos en suelo, enmienda orgánica y planta, se evaluaron en el Laboratorio de Higiene de la Facultad de Medicina, Universidad de la República. Se analizaron muestras de lodos provenientes de 13 PTARD del país, y de muestras de suelos, enmiendas orgánicas y planta del experimento descrito.

La presencia y concentración de coliformes y *Salmonella* se determinó de acuerdo a las técnicas descritas por

Eaton *et al.* (2005) sobre una muestra compuesta por tratamiento, totalizando 36 muestras (seis tratamientos por seis ciclos de cultivo). Se realizaron diluciones seriadas en agua peptonada tamponada BPW pH 7,2 para agitación y mezcla en bolsas plásticas estériles de Stomacher Lab Blender. La determinación del Número Más Probable (NMP) de bacterias coliformes totales por gramo de muestra se realizó mediante siembra y cultivo a 35 °C en series de cinco tubos de Caldo Lauryl Tryptosa (LTB), y la confirmación se hizo en Caldo Bilis Verde Brillante a 35 °C. Para cuantificar NMP de coliformes fecales por gramo de muestra se subinocularon tubos de caldo EC con incubación a 44,5 °C. El NMP de *Salmonella* por gramo de muestra se obtuvo inoculando las muestras diluidas sobre series de tres tubos de caldo Tetratonato y caldo Rappaport-Vassiliadis, incubados a 42-43 °C. A partir de cada tubo se sembraron placas de Hektoen Enteric Agar y agar SS, para posterior identificación completa de las colonias sospechosas que incluyó la clasificación antigénica de las cepas de *Salmonella* recuperadas por seroaglutinación en lámina. Los cálculos de NMP se realizaron sobre tablas de McCrady modificadas por De Man (Blodgett, 2010).

Los análisis parasitológicos para diagnóstico de huevos de helmintos se realizaron con técnicas de concentración por flotación con Sulfato de Zinc (Método de Baillinger modificado por Gaspard y Schwartzbord, 1995). Para la determinación de helmintos en lodo, se colocaron 20 ml de lodo en un recipiente de 1000 ml, se añadieron 200 ml de agua destilada con 10 gotas de Tween 80. Se agitaron durante 30 minutos, se filtró la suspensión en tamiz de 1 mm y se dejó sedimentar el filtrado durante 24 horas. Luego se eliminó el sobrenadante por decantación y se recogieron los 100 ml aproximados de sedimento en 2 tubos de 50 ml, los cuales se centrifugaron a 3000 rpm durante 15 minutos. Se desechó el sobrenadante por decantación y se conservó el

Cuadro 3. Composición inicial del suelo y composición promedio de las enmiendas orgánicas utilizadas.

	Carbono Orgánico	N total	N-NO ₃	P	Na	K	pH en agua
	(%)	(%)	(µg /g)	(µg /g)	(meq/100g)	(meq/100g)	
Suelo	1,40	0,20	100	0,06		0,06	6,72
Lodo fresco	32,39	1,24	---	575	3,00	8,40	
Lodo "compostado" ¹	16,78	1,21	660	884	2,30	11,20	
Cama de pollo ²	23,65	1,28	213	817	12,60	39,10	

¹Lodo "compostado": mezcla de lodo fresco y cáscara de arroz, estacionado a campo.

²Cama de pollo: mezcla de cáscara de arroz y heces producidas durante la cría de pollos en confinamiento, y estacionado a campo por tres meses.

sedimento (uniendo opcionalmente los dos sedimentos en un solo tubo). Al tubo de centrifuga con un volumen S de sedimento, se le agregaron 2S de tampón acetato-acético y se agitaron bien. Se agregaron 6S de acetato de etilo, se taparon y agitaron vigorosamente. Se centrifugó nuevamente a 3000 rpm durante 15 minutos y se decantó el sobrenadante en un solo movimiento, con cuidado de no verter el sedimento. El sedimento se resuspendió en cinco volúmenes de solución saturada de sulfato de Zinc (al 33%), se dejó reposar por cinco minutos y se observó al microscopio. En el caso de tejido vegetal de lechugas, se utilizó el agua de lavado de las mismas, luego de haberlas dejado en remojo durante 24 horas. Se tomaron 200 ml del sedimento para iniciar el proceso de análisis.

Determinación de producción y calidad

Se determinó la producción de lechuga en kg/ha y el contenido de nitratos en tejido vegetal, ($N-NO_3$ $\mu\text{g/g}$ en base seca). Los valores medios de $N-NO_3$ foliar de cada tratamiento se transformaron primero a NO_3-N ($NO_3-N = N-NO_3 \times 4,4268$) y luego a base fresca para su comparación con los estándares establecidos en las Normas de Producción Integrada para la Unión Europea (UE) (Merino y Ansorena, 1993).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó sobre un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones usando el análisis PROC GLM de SAS (Statistical Analysis System, Cary, N.C.; versión 9.28) para el análisis combinado de: niveles de carbono orgánico, nitrógeno total, nitratos, amonio, fósforo, potasio, sodio, conductividad eléctrica y pH en el suelo; rendimiento de lechuga; y coliformes totales, coliformes fecales y *Salmonella* en hojas de lechuga y suelo. En las interacciones las medias fueron analizadas a través de comparaciones múltiples usando la metodología PROC ANOVA BYGROUP de SAS (Kendall, 1993). Para el análisis de coliformes totales, coliformes fecales y *Salmonella* los datos se transformaron a $\log(x+1)$.

Resultados

Efectos de las enmiendas orgánicas en las propiedades químicas del suelo

El análisis combinado del carbono orgánico, nitrógeno total, nitratos y amonio en suelo fue significativa para los efectos ciclo, tratamiento y su interacción ($P < 0,05$), salvo

para el efecto tratamiento en el amonio ($P = 0,065$) (Cuadro 4). Al analizar el efecto de los tratamientos dentro de los ciclos, se observan diferencias entre las enmiendas orgánicas y la fertilización química, para el carbono orgánico, nitrógeno total, nitratos y amonio. El nitrógeno total y el carbono orgánico presentan sus valores máximos para el tratamiento de cama de pollo con mulch en el Ciclo 1 (verano 2005). Para el amonio la fertilización con urea se diferenció de las enmiendas orgánicas en el invierno 2006 (Ciclo 4). Los tratamientos con mulch presentaron los mayores valores de nitratos en el suelo. Al analizar el efecto de los ciclos las diferencias son significativas. Los mayores niveles de nitrato en suelo se registraron en el invierno 2006 con valores entre 22 y 33 μg de $N-NO_3$ / g de suelo.

A pesar de las mismas, se observa una disminución en los niveles de C-org a lo largo del tiempo, salvo en los tratamientos con enmiendas orgánicas sin mulch, posiblemente debido a una menor mineralización de las enmiendas. En el tratamiento con lodo fresco y mulch el C-org pasó de 1,82 a 1,29 %, en el tratamiento con cama de pollo y mulch pasó de 2,17 a 1,30 % y en el tratamiento con fertilización química pasó de 1,40 a 1,26 %.

El análisis combinado del fósforo, potasio, conductividad eléctrica y pH fue significativo para el efecto tratamiento y ciclo ($P < 0,05$), pero no para su interacción (Cuadro 4). En el caso del fósforo los mayores niveles se registraron en las parcelas con agregado de cama de pollo con valores de 43 y 45 μg P_2O_5 / g suelo para los tratamientos con y sin mulch respectivamente, frente a valores de 27 y 30 μg P_2O_5 / g suelo para los tratamientos con lodo con y sin mulch respectivamente.

Efecto de las enmiendas orgánicas en la producción de lechuga

Los rendimientos obtenidos fueron acordes a lo esperado para el cultivo. El análisis combinado para la producción de lechuga fue significativo para los efectos tratamiento, ciclo y su interacción ($P < 0,05$) (Cuadro 4). Dentro de un mismo ciclo, los mejores rendimientos correspondieron a los manejos con mulch, con valores de 27,5 y 24,3 Mkg/ha durante el ciclo más cálido (C5) y 13,3 y 14,8 Mkg/ha durante el ciclo más frío (C3) para los tratamientos con lodo fresco y cama de pollo respectivamente. A su vez, los rendimientos en las parcelas tratadas con lodo fresco sin mulch no se diferenciaron de aquellos obtenidos en los tratamientos con cama de pollo sin mulch y fertilización química, tratamientos «convencionales» en la producción de lechuga a campo. En estos últimos, los rendimientos fueron de

Cuadro 4. Análisis combinado de los ciclos de cultivo y tratamientos para las propiedades químicas del suelo, rendimiento y nitratos en hoja. Probabilidades (P>F) y medias de los tratamientos que presentaron interacciones significativas.

Fuentes de variación	de	C-Org. (%)	N total (%)	N- NO ₃ (µg/g)	NH ₄ (µg/g)	P (µg/g)	K (meq/100g)	Na (meq/100g)	CE (mmhos/cm)	pH (agua)	Rendimiento kg/ha	Nitratos Hoja (µg/g en base seca)
Tratamiento ¹		0,0003	0,0251	<0,0001	0,0650	<0,0001	<0,0001	0,0197	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Ciclo ²		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Tratamiento x Ciclo	x	0,0001	0,0019	0,0001	0,0026	0,6740	0,9741	0,7540	0,0951	0,8520	0,0037	0,0051
T1 ¹	C1 ²	1,4 ns C	0,15 B	18,12 b	6,02 bc						3284 c C	1139 cd C
	C2	1,57 ns	0,152	15,35 bc C	7,9 bc						9246 b BC	8733 a C
	C3	1,48 ns	0,15	11,85 cd	4,5 c						10707 b B	1277 c B
	C4	1,52 ns	0,15	25,92 a	16,43 a B						20035 a B	339 d B
	C5	1,4 ns	0,15	7,00 e AB	13,7 a B						18033 a NS	2423 b B
	C6	1,35 ns	0,13 AB	8,5 de	8,8 b						9008 b NS	
T2	C1	1,82 a B	0,17 B	28,2 ab	8,1 bc						5025 c ABC	2721 b B
	C2	1,47 b	0,16	42,2 a A	6,47 bc						11658 b AB	10707 a AB
	C3	1,42 b	0,15	11,47 cd	3,7 c						13320 b AB	3352 bc A
	C4	1,49 b	0,14	24,22 bc	19,8 a B						25613 a A	1787 c A
	C5	1,46 b	0,16	8,17 d AB	16,6 a AB						27451 a NS	4442 b A
	C6	1,29	0,13 AB	12,95 cd	9,65 b						12032 b NS	
T3	C1	1,59 ns BC	0,15 B	12,52 bc	7,12 b						4119 c BC	929 c C
	C2	1,62 ns	0,17	12,97 b C	5,7 b						9079 c BC	6966 a D
	C3	1,54 ns	0,15	9,32 bc	5,6 b						6592 c C	791,7 c B
	C4	1,68 ns	0,16	22,9 a	17,2 a B						14721 b C	272 c B
	C5	1,46 ns	0,15	6,57 c B	14,4 a B						24402 a NS	2118 b B
	C6	1,36 ns	0,14 AB	7,67 bc	8,72 b						6635 c NS	
T4	C1	1,56 a C	0,16 ab B	22 a	7,57 b						6265 d AB	1160 c C
	C2	1,6 a	0,17 a	18,42 a BC	7,05 b						11859 c AB	9577 a BC
	C3	1,51 ab	0,15 bc	11,12 b	4,1 b						12325 c AB	767 cd B
	C4	1,49 ab	0,15 bc	23,93 a	18,1 a B						17224 b BC	255 d B
	C5	1,3 bc	0,15 bc	7,3 b AB	15,75 a AB						22445 a NS	1939 b B
	C6	1,21 c	0,14 c AB	8,6 b	8,25 b						7865 d NS	
T5	C1	2,17 a A	0,20 a A	31,8 a	7,57 bc						7032 c A	3875 c A
	C2	1,55 b	0,16 b	45,3 a A	6,32 bc						13266 b A	11706 a A
	C3	1,57 b	0,15 b	9,8 b	4,85 c						14774 b A	3835 c A
	C4	1,59 b	0,15 b	32,9 a	18 a B						26793 a A	1630 d A
	C5	1,49 bc	0,15 b	9,1 b A	21,27 a A						24282 a NS	5280 b A
	C6	1,30 c	0,14 b AB	14,8 b	9,67 b						10864 bc NS	
T6	C1	1,40 ab C	0,15 b B	18,12 a	7,52 bc						4818 c ABC	930 c C
	C2	1,46 a	0,15 b	22,9 a BC	17,77 b						7739 bc C	89440 a BC
	C3	1,51 a	0,15 b	10,7 b	4,27 c						13735 b AB	838 c B
	C4	1,56 a	0,17 a	22,0 a	31,3 a A						13621 b C	280 c B
	C5	1,38 ab	0,14 b	7,8 b AB	14,42 bc B						24184 a NS	1839 b B
	C6	1,26 b	0,13 c B	8,2 b	7,42 bc						7042 bc NS	

¹ 1 lodo fresco, 2 lodo fresco con mulch plástico, 3 lodo "compostado", 4 cama de pollo, 5 cama de pollo con mulch plástico, 6 fertilización química.

² C1 y C2 – Verano 2005-06, C3 y C4 – Invierno 2006, C5 y C6 – Verano 2006-07.

* Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de rango múltiple de Duncan ($P \leq 0,05$), en la columna letras minúsculas indican diferencias entre ciclos para un mismo tratamiento, letras mayúsculas indican diferencias entre tratamientos para un mismo ciclo.

10,7, 12,3 y 13,7 Mkg/ha durante el ciclo más frío (C3) y 18,0, 22,4 y 24,2 Mkg/ha durante el ciclo más cálido (C5) para los tratamientos lodo fresco, cama de pollo y fertilización química respectivamente.

Análisis microbiológicos de las enmiendas y su efecto en el suelo

Los análisis microbiológicos de los lodos provenientes de 13 PTARD revelaron contenidos de coliformes totales entre 120.000 y 2.000.000 NMP/g, y de coliformes fecales entre <20 y >160.000 NMP/g, dependiendo de su tiempo de estacionamiento y grado de humedad. En siete muestras se encontraron bacterias del género *Salmonella*, especie *Salmonella enterica*, en concentraciones variables entre 3 y 150 NMP/g, y los serotipos encontrados fueron *Enteritidis*, *Panamá*, *Bredeney*, *Agona*, *Typhimurium* y *San Diego*. Solamente una contenía huevos de helmintos, pertenecientes a los géneros *Ascaris*, *Ancylostoma*, *Hymenolepis* y *Trichuris*.

Las tres muestras de lodos compostados empleadas en el experimento revelaron contenidos de coliformes totales entre <180 y 35.000-NMP/g y de coliformes fecales entre <180 y 200 NMP/g. No se recuperó *Salmonella* y solo en una de ellas se detectó la presencia de huevos de *Ascaris*. Por otra parte, las muestras de cama de pollo revelaron contenidos microbianos menores a los mencionados para los lodos.

Los suelos analizados presentaron niveles de coliformes totales altamente variables, entre 200 y 54.000 NMP/g. Los valores medios menores correspondieron a los tratamien-

tos con fertilización química, y los mayores a aquellos con cama de pollo. Las concentraciones de coliformes fecales variaron entre <180 y 4.800 NMP/g, sin diferenciarse significativamente entre tratamientos. Los niveles de *Salmonella* estuvieron debajo del límite de detección (<3 NMP/g) y no se recuperaron huevos de helmintos (Cuadro 6).

Efecto de las enmiendas orgánicas en la calidad bromatológica de la lechuga

El análisis combinado para el nivel de nitratos en hoja fue significativo para los efectos tratamiento, ciclo y su interacción ($P < 0,05$) (Cuadro 4). Al dejar fijo el efecto ciclo, los niveles más altos de nitratos en hojas se registraron en los tratamientos con enmienda orgánica y mulch. Sin embargo, nunca se superaron los límites máximos admitidos por la Unión Europea para lechugas cultivadas a campo (Cuadro 5): 2500 mg $\text{NO}_3\text{-N/kg}$ de materia fresca (MF) para los cultivos primavera-estivales, y 4500 mg $\text{NO}_3\text{-N/kg}$ MF para los cultivos invernales (Merino y Ansorena, 1993).

Los análisis microbiológicos de las hojas de lechuga no presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 6). Los mayores niveles de coliformes totales se registraron en el tratamiento con fertilización química, mientras que los tratamientos con lodos frescos presentaron los mayores niveles de coliformes fecales.

Discusión

En Europa, los niveles de empleo de lodos urbanos en la agricultura varían entre países, con una media de 40%

Cuadro 5. Valores medios¹ de nitratos en hoja (mg $\text{NO}_3\text{-N/kg}$ de lechuga en base fresca) para cada combinación de tratamiento por ciclo productivo.

Tratamiento ²	Ciclo ³				
	C2	C3	C4	C5	C6
T1	42,9	386,5	104,5	24,8	91,2
T2	132,5	593,2	356,1	201,9	220,4
T3	35,0	189,5	47,3	27,7	58,1
T4	56,7	486,9	54,3	23,7	63,1
T5	214,3	699,4	424,5	162,5	235,9
T6	28,8	46,4	46,4	27,8	53,3
Promedio	85,0	483,0	172,2	78,0	120,3

¹ Valores calculados en base a los datos promedio de N-NO_3 ($\mu\text{g/g}$) en base seca, transformados primero a $\text{NO}_3\text{-N}$ ($\text{NO}_3\text{-N} = \text{N-NO}_3 \times 4,4268$) y luego a base fresca según el contenido de humedad de la muestra.

² T1: lodo fresco, T2: lodo fresco con mulch plástico, T3: lodo "compostado", T4: cama de pollo, T5: cama de pollo con mulch plástico, T6: fertilización química.

³ C1 y C2 – Verano 2005-06, C3 y C4 – Invierno 2006, C5 y C6 – Verano 2006-07.

Cuadro 6. Valores promedio¹ de Coliformes totales (NMP/g), Coliformes fecales (MNP/g) y *Salmonella* (NMP/g) en hojas de lechuga y suelo para cada tratamiento en los ciclos de cultivo.

Tratamiento ²	Coliformes totales (NMP/g) ³		Coliformes fecales (NMP/g)		Salmonella (NMP/g)	
	Hoja	Suelo	Hoja	Suelo	Hoja	Suelo
T1	2951	2188 b ³	87	251	2,10	3,00
T2	416	2884 b	62	447	2,10	3,00
T3	4677	1906 b	14	331	2,10	3,00
T4	2884	3631 b	23	159	2,21	3,00
T5	3715	6918 a	13	191	2,10	3,00
T6	11220	1549 b	24	219	2,09	3,00
P>F	0,544	0,015	0,415	0,415	0,456	
CV	15,17	8,71	54,76	43,00	5,68	

¹ Se presentan los datos originales. Para su análisis los datos fueron transformados por $L(x+1)$.

²T1: lodo fresco, T2: lodo fresco con mulch plástico, T3: lodo "compostado", T4: cama de pollo, T5: cama de pollo con mulch plástico, T6: fertilización química.

³NMP/g, datos transformados $L(x+1)$.

Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias significativas según la prueba de MDS para ($P \leq 0,05$).

del volumen de lodos producidos (Renner, 2000). En USA también son ampliamente empleados en la agricultura, y el 70% de ellos cumple con los estándares de seguridad definidos por la USEPA, para metales pesados y para patógenos humanos (Ozores-Hampton y Peach, 2002). En Brasil, trabajos desarrollados en los estados de Paraná y San Pablo, confirmaron que el reciclaje agrícola del lodo es una técnica alternativa para el tratamiento del mismo, cuando los tenores de metales pesados y la presencia de organismos patógenos para el ser humano están dentro de los límites propuestos por la legislación (Bettiol y Camargo, 2006; Fernández, 2000).

La respuesta positiva de los cultivos al agregado de lodos ha sido ampliamente informada para varios cultivos y bajo diferentes sistemas productivos, y dichas respuestas se explican no solo por el aporte de nutrientes sino también por las mejoras en las condiciones físicas del suelo (Barbarick *et al.*, 2012; Bettiol y Camargo, 2006; Ozores-Hampton y Peach, 2002).

Durante los dos años de experimentación, las aplicaciones de los lodos frescos o compostados se comportaron de forma semejante al manejo convencional del cultivo (uso de cama de pollo, fertilización química) para las propiedades químicas del suelo analizadas. Se constataron diferencias entre los ciclos de cultivo para el nitrógeno en el suelo por el efecto de la temperatura y humedad del suelo en la

mineralización de las enmiendas, en particular en los procesos de nitrificación y amonificación.

La mineralización de los lodos (30% en promedio para lodos de origen aerobio) libera cantidades significativas de nitratos y amonio, por tanto el uso responsable de este material se debe establecer según la capacidad de extracción de N por el cultivo (Bettiol y Camargo, 2006). Una forma indirecta de evaluar el exceso de nitratos en el suelo es mediante el contenido de nitratos en el tejido vegetal cosechado. En el presente trabajo, los niveles de nitratos en hojas de lechuga no superaron los niveles máximos permitidos y considerados riesgosos para la salud humana (Merino y Ansorena, 1993). A su vez, el aporte de N fue suficiente para permitir un correcto desarrollo del cultivo, con rendimientos semejantes a los obtenidos bajo manejo convencional en los diferentes ciclos evaluados.

Respecto al P se ha informado sobre el riesgo de la acumulación en el suelo como consecuencia de la utilización repetida de los lodos (Ozores-Hampton *et al.*, 2000). Sin embargo en nuestro trabajo ese riesgo es semejante al del uso repetido de cama de pollo, considerado «convencional» en el cultivo. Igualmente, el riesgo potencial de la acumulación de P en el suelo no debe ignorarse, y durante la producción y estabilización de los lodos deberán evaluarse los procesos que tiendan a reducir sus niveles de fósforo.

Independientemente del potencial de los lodos como enmienda orgánica al suelo por su aporte en nutrientes, la definición final de su uso agrícola dependerá también de los niveles de patógenos humanos (helmintos, *Salmonella*, coliformes fecales y totales) y de los niveles de metales pesados y contaminantes orgánicos presentes en las partidas de lodos que se quiera emplear. En el caso de los patógenos humanos, la verificación de estos rangos o límites no requiere del análisis exhaustivo de cada uno de ellos, sino de la presencia y concentración de organismos indicadores que por su ubicuidad y labilidad son aptos como marcadores indirectos de la potencial presencia de los primeros. Como se observó en las partidas de lodos recibidas para su análisis, algunas de ellas presentaron valores superiores a los admitidos para su uso agrícola, mientras que las partidas empleadas en los experimentos con los cultivos de lechuga estaban dentro de los límites internacionales (Argentina. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2001; Fernández, 2000; Ozores-Hampton y Peach, 2002; Strauss, 2000).

Para minimizar el riesgo de contaminación de los alimentos por patógenos humanos además de establecer la carga de patógenos deberán de respetarse tiempos mínimos entre la aplicación de los lodos y la cosecha de los cultivos. Estos tiempos se definen en base a las estimaciones de supervivencia de los patógenos en el suelo, los cuales responden a condiciones locales de tipo de suelo (tipo de arcilla, pH, contenido de materia orgánica) y clima (Ngole *et al.*, 2006). Es por ello que las normas internacionales varían de 14 a seis meses para cultivos hortícolas o frutales en Argentina (Argentina. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2001), hasta 30 meses en el Reino Unido (Gale, 2005). En el presente trabajo, no se observó contaminación por coliformes en los vegetales cultivados ni en el suelo fertilizado con lodo fresco o comportado, incluso luego de un período de espera de 30 días (Cuadro 1). La sobrevivencia de coliformes en el suelo es baja y tiempos de espera de 90 días serían suficientes para minimizar los riesgos de contaminación (Ngole *et al.*, 2006). Sin embargo, la sobrevivencia de los otros patógenos, como helmintos y virus, es mucho mayor, lo cual justifica las recomendaciones internacionales acerca de tiempos de espera.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, los lodos urbanos podrían emplearse como enmienda or-

gánica al suelo, pues presentaron un comportamiento semejante a las enmiendas orgánicas tradicionales de la producción agrícola. Sin embargo, debido a los riesgos potenciales de contaminación de alimentos y suelos, su uso deberá regularse. Los lodos con potencial uso agrícola deberán presentar niveles de contaminantes (patógenos humanos, metales pesados, etc.) debajo de los máximos establecidos y manejarse según normas claramente definidas para volumen máximo de aplicación, formas de transporte y disposición, y tiempos de espera.

Agradecimientos

Al personal de INIA Las Brujas por su colaboración en los trabajos de campo realizados. Al personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de OSE-Florida por proveernos de los biosólidos para el estudio. Al Programa de Desarrollo Tecnológico del Uruguay por la financiación del proyecto (Proyecto PDT 32-12).

Bibliografía

- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo I: Clasificación de suelos. Montevideo: MAP, Dirección de Suelos y Fertilizantes. 96p.
- Argentina. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. 2001. Resolución 97/01. Reglamento para el Manejo Sustentable de Barros Generados en Plantas de Tratamiento de Efluentes Líquidos [En línea]. Consultado noviembre 2011. Disponible en: http://www2.medioambiente.gov.ar/mlegal/agua/res97_01/res97_01.htm.
- Barbarick KA, Ippolitob JA, McDanielc J, Hansenc NC, Petersonc GA. 2012. Biosolids application to no-till dryland agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 150: 72-81.
- Bettiol W, Camargo OA. 2006. Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura. Jaguarúna: EMBRAPA. 349p.
- Blodgett R. 2010. Most probable number from serial dilutions [En línea]. En: *Bacteriological analytical manual*. Consultado noviembre 2011. Disponible en: <http://www.fda.gov/Food/ScienceResearch/LaboratoryMethods/BacteriologicalAnalyticalManualBAM/ucm109656.htm>.
- Díaz R. 1994. Cambios en el largo plazo en el carbono y nitrógeno del suelo bajo rotación de cultivos con pasturas de leguminosas. En: Alejandro Morón, Walter E, Baethgen, Roberto M, Díaz Rossello [Eds.]. *Materia orgánica en la rotación cultivo-pastura*. Montevideo: INIA. (Serie Técnica; 41). pp. 10-12.
- Dos Santos I, Bettiol W. 2003. Effect of sewage sludge on the rot and seedling damping-off of bean plants caused by *Sclerotium rolfsii*. *Crop protection*, 22: 1093-1097.
- Eaton AD, Clesceri LS, Rice AW, Greenberg AE, Franson MAH. 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater: Centennial Edition*. 21st ed. Washington: American Public Health Association. 1368 p.
- Epstein E. 1998. Health Issues in Organics Recycling - Pathogenic health aspects of land application. *BioCycle*, September: 62-67.

- Fernandes F. 2000. Estabilização e higienização de biossólidos. En: Wagner Bettiol W, Camargo OA. [Eds.]. Impacto Ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: EMBRAPA. pp. 45-67.
- Gale P. 2005. Land application of treated sewage sludge: quantifying pathogen risks from consumption of crops. *Journal of Applied Microbiology*, 98: 380-396.
- García de Souza M, Alliaume F, Mancassola V, Dogliotti S. 2011. Carbono orgánico y propiedades físicas del suelo en predios hortícolas del sur de Uruguay. *Agrociencia*, 15(1): 70-81.
- Gaspard PG, Schwartzbord J. 1995. Helminth eggs in wastewater: quantification technique. *Water Science and Technology*, 31: 443-446.
- Jorge JA, Camargo OA, Valladares JMAS. 1991. Condição físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15: 237-240.
- Kendall JA. 1993. Strategies for performing multiple comparisons on means. En: SAS Conference Proceedings: SAS Users Group International 18 (SUGI 18); 9-12 Mayo 1993; New York. pp. 1283-1289.
- Kibblewhite MG, Ritz K, Swift MJ. 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363: 685-701.
- Kirkham MB. 1982. Agricultural use of phosphorus in sewage sludge. *Advance Agronomy*, 35: 129-163.
- Leoni C, Ghini R. 2006. Sewage sludge effect on management of *Phytophthora nicotianae* in citrus. *Crop Protection*, 25: 10-22.
- Marciano CR. 1999. Incorporação de resíduos urbanos e as propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo [Tesis doctorado]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura «Luiz de Queiroz». Universidade de Sao Paulo. 93p.
- Merino D, Ansorena J. 1993. Recomendaciones para el cultivo de hortalizas con bajo contenido de nitratos. *Horticultura*, 90: 11-21.
- Ngole V, Mpuchane S, Totolo O. 2006. Survival of faecal coliforms in four different types of sludge-amended soils in Botswana. *European Journal of Soil Biology*, 42: 208-218.
- Ozores-Hampton M, Peach DRA. 2002. Biosolids in vegetable production systems. *HortTechnology*, 12(3): 336-340.
- Ozores-Hampton M, Stansly PA, Obreza TA. 2000. Biosolids and soil solarization effects on bell pepper (*Capsicum annuum*) production and soil fertility in a sustainable production system. *HortScience*, 35: 443.
- Renner R. 2000. Sewage Sludge, Pros and Cons. *Environmental Science and Technology*, 34: 119.
- Strauss EL. 2000. Normas de utilizacao de lodos de esgoto na agricultura. En: Bettiol W, Camargo OA. [Eds.]. Impacto