

EFFECTO DE ENMIENDAS CON LODOS URBANOS Y DE SALMONICULTURA EN LA ESTRUCTURA DE UN ENTISOL Y UN ALFISOL EN CHILE

EFFECT OF SEWAGE SLUDGE AND SALMON WASTES AMENDMENTS ON THE STRUCTURE OF AN ENTISOL AND ALFISOL IN CHILE

Marco Sandoval-Estrada^{1*}, José Celis-Hidalgo², Neil Stolpe-Lau¹, Juan Capulín-Grande³

¹Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Casilla 537, Chillán, Chile (masandov@udec.cl). Centro de Investigación de Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), Coyhaique, Chile. ²Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Veterinarias, Chillán, Chile. Centro de Investigación de Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), Coyhaique, Chile. ³Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, México.

RESUMEN

En Chile la generación de lodos urbanos pasó de 200 t d⁻¹ a 300 t d⁻¹ para el 2010, mientras que la industria del salmón incrementó su producción de 50 000 t anuales en 1990 a 397 000 t el 2007 y se generó 1.4 t de lodo por cada t de salmón producido. Además, estos residuos orgánicos son aplicados al suelo sin analizar sus efectos en las propiedades físicas. En esta investigación se analizó los efectos de enmiendas con lodos urbanos y salmónicolas en la distribución y estabilidad de agregados (diámetro peso medio, DPM) en un Entisol y Alfisol degradados. Los tratamientos fueron: lodo urbano (LU), lodo de piscicultura (LP), lodo salmónico lacustre (LL), en dosis de 25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹ y un testigo absoluto (TS), sin enmendar. Hubo dos tratamientos adicionales con ballico (*Lolium multiflorum* L.): suelo sin lodo (TC) y suelo con fertilización inorgánica (FN). El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones y se usó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para comparar medias. A los seis meses hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre las dosis aplicadas en los dos tipos de suelos degradados. En el Entisol las enmiendas con lodos LU (100 y 150 t ha⁻¹) y LP (100 y 150 t ha⁻¹) aumentaron la cantidad de macroagregados (≥ 0.25 mm) para LU (64.15 %) y LP (66.7 %) además de una mejor DPM ($p \leq 0.05$), comparado con TS, TC y FN; pero con LL no hubo diferencias significativas. En el Alfisol, con LU hubo mayor cantidad de macroagregados (≥ 0.25 mm) a dosis de 100 (34.1 %) y 150 t ha⁻¹ (33.0 %), mientras que con las dosis 100 y 150 t ha⁻¹ LU, LP y LL mostraron valores más altos de DPM respecto al testigo absoluto ($p \leq 0.05$).

ABSTRACT

In Chile the generation of sewage sludge increased from 200 t d⁻¹ in 1990 to 300 t d⁻¹ in 2010, while the salmon industry increased its production from 50 000 t annually in 1990 to 397 000 t in 2007 and generated 1.4 t of sludge per t of salmon produced. In addition, these organic wastes are applied to the soil without analyzing their effects on physical properties. This study analyzed the effects of amendments with urban and salmon sludge in the distribution and stability of aggregates (mean weight diameter, DPM) in a degraded Entisol and Alfisol soil. The treatments were: sewage sludge (LU), land-farmed salmon sludge (LP), lake-salmon sludge (LL), at doses of 25, 50, 75, 100 and 150 t ha⁻¹, and an absolute control (TS), not amended. There were two additional treatments with ryegrass (*Lolium multiflorum* L.): soil without sludge (TC) and soil with inorganic fertilizer (FN). The experimental design was completely randomized with three replicates, and Tukey test ($p \leq 0.05$) was used to compare means. After six months there were significant differences ($p \leq 0.05$) between the doses used in the two types of degraded soils. In the Entisol, amendments at 100 and 150 t ha⁻¹ increased the amount of macroaggregates (≥ 0.25 mm) for LU (64.15 %) and LP (66.7 %), and led to a better DPM ($p \leq 0.05$), as compared to TS, TC and FN, whereas LL showed no significant differences. In the Alfisol, with LU the amount of macroaggregates (≥ 0.25 mm) was greater at doses of 100 (34.1 %) and 150 t ha⁻¹ (33.0 %), whereas with the doses 100 and 150 t ha⁻¹ LU, LP and LL showed higher values of DPM than the absolute control ($p \leq 0.05$).

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Abril, 2009. Aprobado: Marzo, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 503-515. 2010.

Keywords: *Lolium multiflorum*, biosolids, stability of aggregates, macroaggregates, soil remediation.

Palabras clave: *Lolium multiflorum*, biosólidos, estabilidad de agregados, macroagregados, remediación, suelos.

INTRODUCCIÓN

La calidad física de un suelo depende de la cantidad de partículas que pueden formar agregados, donde la materia orgánica (MO) tiene una función preponderante en el desarrollo de la estructura (Ellies, 2004). Los suelos degradados presentan una infiltración pobre, una mala aireación, baja actividad biológica y reducido movimiento de nutrientes, por lo cual se restringe el crecimiento de las raíces (Traore *et al.*, 2000).

La biota y los productos orgánicos contribuyen al desarrollo de la estructura del suelo (Chan *et al.*, 2003), la cual tiene una función fundamental en cualquier sistema edáfico y en los procesos sostenidos de la biota en el suelo, y se puede cuantificar mediante la estabilidad de los agregados del suelo (Bronick y Lal, 2005). La estabilidad de los agregados es un indicador de la estructura del suelo, que resulta del arreglo de las partículas, la floculación y la cementación (Six *et al.*, 2000). Un orden jerárquico en la estructura de los suelos permite diferenciar entre macroagregados (≥ 0.25 mm) y microagregados (< 0.25 mm), según Oades y Waters (1991). El incremento de microagregados del suelo está relacionado con la pérdida de la estabilidad estructural y la calidad del suelo (Carter, 2004).

Las ciudades chilenas generan lodos municipales, que son acumulaciones de sólidos orgánicos sedimentables separados por procesos de tratamiento de aguas. Se producen alrededor de 200 t d⁻¹ de lodos secos, lo cual aumentará a 300 t al final de la presente década (Celis *et al.*, 2006). Además, Chile es el principal productor de salmón del mundo, con 490 000 t año⁻¹ (Teuber *et al.*, 2005); por cada t de salmón se generan 1.4 t de desechos orgánicos, en forma de lodos constituidos principalmente por excretas y alimento no consumido (Celis *et al.*, 2006). El manejo inadecuado de estos lodos puede presentar inconvenientes para la salud y el ambiente, mediante la carga de microorganismos patógenos y el contenido de metales pesados (Mazzarino *et al.*, 1997), y problemas de hidrofobia en caso de aplicaciones excesivas (Cuevas *et al.*, 2006). Además, su alto contenido de nitrógeno puede ser un riesgo por lixiviación de nitratos y eventual contaminación de capas

INTRODUCTION

The physical quality of a soil depends on the amount of particles that can form aggregates, where organic matter (OM) has a major role in the development of the structure (Ellies, 2004). Degraded soils have poor infiltration, bad aeration, reduced biological activity and movement of nutrients, thus restricting the growth of roots (Traore *et al.*, 2000).

The biota and organic products contribute to the development of soil structure (Chan *et al.*, 2003), which has a key role in any soil system and biota sustained processes on the soil, and can be quantified through the stability of soil aggregates (Bronick and Lal, 2005). Aggregate stability is an indicator of the soil structure, resulting from the arrangement of particles, flocculation and cementation (Six *et al.*, 2000). A hierarchy in the structure of soils allows to differentiate between macroaggregates (≥ 0.25 mm) and microaggregates (< 0.25 mm), according to Oades and Waters (1991). The increase of soil microaggregates is related to the loss of structural stability and soil quality (Carter, 2004).

Chilean cities generate municipal sludge, which are accumulations of sedimentary organic solids separated by water treatment processes. About 200 t d⁻¹ of dry sludge are produced, which will increase to 300 t at the end of this decade (Celis *et al.*, 2006). Besides, Chile is the largest producer of salmon in the world with 490 000 t yr⁻¹ (Teuber *et al.*, 2005); for each t of salmon 1.4 t of organic waste in the form of sludge are generated, consisting mainly of excreta and not consumed food (Celis *et al.*, 2006). Improper management of sludge may pose risks to health and the environment, through the load of pathogenic microorganisms and heavy metal content (Mazzarino *et al.*, 1997), as well as problems of rabies in the event of excessive applications (Cuevas *et al.*, 2006). In addition, its high content of nitrogen can be a risk as a result of nitrate leaching and potential contamination of groundwater and surface water layers (Mazzarino *et al.*, 1997). Salmon sludge, rich in nutrients accumulates on the bottom of the sea or lakes, posing a threat to the productive efficiency of the salmon industry and potential contamination to the aquatic environment (Salazar and Saldaña, 2007).

subterráneas y aguas superficiales (Mazzarino *et al.*, 1997). Los lodos salmonícolas, ricos en nutrientes, se acumulan en los fondos marinos o lacustres, representando una amenaza a la eficiencia productiva de la salmonicultura y una contaminación potencial para el medio acuático (Salazar y Saldaña, 2007).

Los lodos urbanos y salmonícolas poseen características como mejoradores del suelo (Teuber *et al.*, 2005), y su aplicación serviría para recuperar suelos degradados. Estos lodos pueden tener hasta 50 % de MO (Celis *et al.*, 2006) y pueden mejorar las características físicas del suelo, como estructura, capacidad de retención de agua y difusión de masa (Six *et al.*, 2000). La MO del suelo es vital en la formación de agregados estables y de un sistema poroso secundario que permite que el agua se filtre en el perfil del suelo, para una mejor aireación y retención de humedad (Ellies, 2004; Annabi *et al.*, 2007). El aporte de MO y el aumento de la estabilidad de agregados pueden reducir la tendencia del suelo a la compactación y aumentar la resistencia del suelo a la deformación, debido a que la degradación en gran parte es controlada por la presencia y abundancia de macroagregados estables al agua (Bayhan *et al.*, 2005).

En Chile hay alrededor de 76 millones ha de suelos, de las cuales 46 % presenta algún grado de erosión, con 27 % calificado como grave (Pérez y González, 2001). Los suelos Alfisoles chilenos se encuentran principalmente entre la V y VIII Regiones que comprenden la zona centro norte, central y centro sur del país, ubicándose preferentemente en parte de la cordillera de la costa y depresión intermedia (Luzio *et al.*, 2006), donde alrededor de 2 millones ha (63 %) están fuertemente erosionadas (Santibáñez, 2000). En la patagonia chilena hay 3 595 600 ha con suelos Entisoles mayoritariamente derivados de cenizas volcánicas, que representan 1 602 220 ha (Cruces *et al.*, 1999). Estos suelos han experimentado diversos procesos de erosión antropogénica y 17.3 % de la superficie total de la XI Región sufre erosión severa (Pérez y González, 2001). Esto implica un enorme potencial de suelos degradados que podrían ser destinados como reservorios para el reciclaje de residuos orgánicos.

Las aplicaciones de lodos orgánicos aumentan la estabilidad de los agregados del suelo (Cuevas *et al.*, 2006) y la adición de residuos vegetales a suelos susceptibles a la erosión es beneficiosa para el sistema edáfico (Sandoval *et al.*, 2008). El Ministerio de

Salmon and sewage sludge show characteristics which improve the soil (Teuber *et al.*, 2005), and their application might serve to restore degraded soils. Sludge can be made up to 50% of OM (Celis *et al.*, 2006) and can improve soil physical characteristics such as structure, water holding capacity and mass diffusion (Six *et al.*, 2000). The soil OM is vital in the formation of stable aggregates and a secondary porous system that allows water to seep into the soil profile, and have better aeration and moisture retention (Ellies 2004; Annabi *et al.* 2007). The contribution of OM and increased aggregate stability can reduce the soil tendency to compaction and increase soil resistance to deformation because degradation is largely controlled by the presence and abundance of macroaggregates stable in water (Bayhan *et al.*, 2005).

In Chile there are around 76 million ha of land, of which 46 % have some degree of erosion, with 27 % classified as serious (Pérez and González, 2001). Alfisols in Chile are mainly between regions V and VIII comprising the central north, central and south central areas of the country, mostly located in part of the Cordillera de la Costa (coastal range) and intermediate depression (Luzio *et al.*, 2006), where about 2 million ha (63 %) are strongly eroded (Santibáñez, 2000). The Chilean Patagonia has 3 595 600 ha including Entisols, most of them derived from volcanic ash, amounting to 1 602 220 ha (Cruces *et al.*, 1999). These soils have experienced various human-induced erosion processes and 17.3% of the XI region total area suffers severe erosion (Pérez and González, 2001). This implies a huge potential for degraded soils that could be used as reservoirs for the recycling of organic waste.

Organic sludge applications increase the stability of soil aggregates (Cuevas *et al.*, 2006), and the addition of plant residues to soils susceptible to erosion is beneficial to the soil system (Sandoval *et al.*, 2008). The Ministry of Agriculture of Chile has a recovery program of degraded soils with great emphasis on phosphate fertilization, lime amendments, grasslands, soil conservation practices and crop rotation, but does not encourage the use of sewage sludge.

The hypothesis of this study was that the amendments with sewage sludge and salmon wastes improve soil structure. The objective was to evaluate the effect of different doses of sewage sludge and

Agricultura de Chile mantiene un programa de recuperación de suelos degradados con fuerte énfasis en la fertilización fosfatada, enmiendas calcáreas, praderas, prácticas de conservación de suelos y rotación de cultivos, pero no estimula el uso de lodos residuales.

La hipótesis para el presente estudio fue que las enmiendas con lodos urbanos y salmonícolas mejoran la estructura del suelo. El objetivo fue evaluar el efecto de dosis de lodos residuales municipales y salmonícolas sobre la distribución y estabilidad de los agregados de suelos Entisol y Alfisol degradados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de muestras de suelos y lodos

Las muestras del suelo patagónico fueron recolectadas en la Región de Aysén, sector Coyhaique (45° 31' 38, 33" S y 71° 45' 0, 46" O). Estos suelos pertenecen al orden Entisol (Celis *et al.*, 2008) presentan textura franco arenosa, pendientes suaves (<5 %), y densidad aparente 1 kg m⁻³. La zona de muestreo corresponde a la estepa fría ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes hacia el límite con Argentina; la precipitación anual es 300 mm repartida homogéneamente en el año y durante el invierno (junio a agosto) cae como nieve.

La zona de muestreo del suelo Alfisol corresponde a la Región del Biobío, Comuna de Quillón (36° 44' 23, 92" S y 72° 29' 22, 26" O); pertenecen al seco costero ubicado en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa. Estos suelos son de textura arcillosa, con fuerte pendiente (>15 %) y densidad aparente 1.4 kg m⁻³. El clima es mediterráneo con una estación seca (seis meses), seguida por un periodo húmedo con una precipitación promedio anual de 1100mm (Celis *et al.*, 2006). Las muestras de ambos suelos fueron tomadas desde los primeros 20 cm de profundidad.

Los tipos de lodos fueron: urbano municipal, de la planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Coyhaique (45° 34' S; 72° 04' O); piscicultura salmonídea, de estanques de acumulación de residuos del cultivo de alevines, localizada a 10 km de Puerto Octay (40° 56' S; 72° 53' O); y salmonídeo lacustre, extraído debajo de jaulas de crianza, usando una draga a 20 m de profundidad del fondo del lago Tarahuín (42° 46' S; 73° 42' O). Los lodos fueron secados a temperatura ambiente (20±2 °C) y pasados por tamiz de 2 mm.

Los resultados de los análisis de MO, según técnica Walkley-Black digestión húmeda (Sadzawka *et al.*, 2006), fueron: Alfisol (2.5 %), Entisol (2.9 %), lodo urbano 49.9 %, lodo de piscicultura 20.7 %, y lodo de salmonicultura lacustre 18.3 %.

salmon wastes on the distribution and stability of aggregates of degraded Entisol and Alfisol soils.

MATERIALS AND METHODS

Collection of soil and sludge samples

Soil samples were collected in the Patagonian region of Aysén, Coyhaique sector (45 ° 31' 38, 33" S and 71 ° 45' 0, 46" W). These soils belong to the group of Entisols (Celis *et al.*, 2008) and have a sandy loam texture, gently sloping (<5 %), and bulk density 1 kg m⁻³. The sampling area corresponds to the cold steppes located on the eastern slopes of the Andes towards the border with Argentina; the annual precipitation is 300 mm, evenly distributed throughout the year, and falling as snow during the winter (June to August).

The Alfisol soil sampling area corresponds to the Bío Bío region, Quillón commune (36 ° 44' 23, 92" S and 72 ° 29' 22, 26" W), belonging to the dry coastline located on the eastern slope of the Chilean Coastal Mountains. These soils are of clayey texture, steep (>15 %) and bulk density 1.4 kg m⁻³. The climate is Mediterranean with a dry season (six months), followed by a wet period with an average annual rainfall of 1100mm (Celis *et al.*, 2006). Both soil samples were taken from the first 20 cm deep.

The sludge types were: sewage sludge from the wastewater treatment plant of the city of Coyhaique (45 ° 34' S, 72 ° 04' W); land-farmed salmon sludge from accumulation ponds at a pisciculture located 10 km from Puerto Octay (40 ° 56' S, 72 ° 53' W); and lake-salmon sludge, extracted below breeding cages using a dredge at 20 m deep from the bottom of the lake Tarahuín (42 ° 46' S, 73 ° 42' W). The sludge was dried at room temperature (20±2 °C) and passed through a 2 mm sieve.

The results of the OM analysis, according to the technique Walkley-Black wet digestion (Sadzawka *et al.*, 2006) were: Alfisol (2.5 %), Entisol (2.9 %), sewage sludge, 49.9 %; land-farmed salmon sludge, 20.7 %; and lake-salmon sludge, 18.3 percent.

Test preparation

For both types of soils, an experiment with potted plants in greenhouse was set, with eight treatments, three replicates, and a completely randomized design; the experimental unit was the pot. The treatments were: sewage sludge (LU), land-farmed salmon sludge (LP) and lake-salmon sludge (LL), applied to soil at doses of 25, 50, 75, 100 and 150 t ha⁻¹. In addition there were two additional treatments without sludge: soil with ryegrass (*Lolium multiflorum*) seeding (TC) and TC soil plus inorganic

Preparación del ensayo

Para ambos tipos de suelos se estableció un experimento con macetas en invernadero, con ocho tratamientos, tres repeticiones, y un diseño experimental completamente al azar; la unidad experimental fue la maceta. Los tratamientos fueron: lodo urbano (LU), lodo de piscicultura salmonídea (LP) y lodo salmonícola lacustre (LL), aplicados al suelo en dosis de 25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹. Además hubo dos tratamientos adicionales sin lodo: suelo con siembra de *Lolium multiflorum* (TC); y suelo TC más fertilización inorgánica (FN) de 140 kg N ha⁻¹, 131 kg K₂O ha⁻¹ y 200 kg P₂O₅ ha⁻¹. Se incluyó un testigo absoluto de solo suelo (TS). Para calcular las dosis de lodos y de fertilizante para cada suelo se consideró 1 kg de suelo por maceta, la densidad aparente del suelo correspondiente y la profundidad de muestreo. Los dos suelos fueron tamizados por malla 2 mm para homogenizar el material inicial. Una vez establecidos los tratamientos, las macetas fueron cubiertas completamente con bolsas de polietileno e incubadas por 30 d a 25 °C y 60-70 % capacidad de campo. Los tratamientos TC y FN fueron sembrados con *L. multiflorum* L. variedad Winter star, con una dosis de 30 semillas por maceta, manteniendo 60 % capacidad de campo y 20 °C. El experimento duró seis meses, y al final se determinó la distribución y la estabilidad de los agregados en cada maceta.

Distribución y estabilidad de agregados

El suelo de cada maceta fue secado a temperatura ambiente (20±2 °C), se tomaron muestras de suelo que fueron secadas en horno a 40 °C por 24 h (Le Bissonnais, 1996), y pasadas por tamiz de 4 mm. Luego se transfirieron 100 g de cada muestra a un conjunto de tamices, de mayor a menor: 2; 1; 0.5; 0.25 y 0.05 mm (diámetro). Los tamices se sumergieron 15 min en agua y se agitaron a 25 ciclos min⁻¹ (Yoder, 1936).

Para el suelo Entisol, el porcentaje de agregados por tamaño se calculó de la masa seca de los agregados que quedaron en cada tamiz con relación al total de la muestra. El diámetro peso medio (DPM), indicador de la estabilidad de los agregados, se determinó según la fórmula de Kemper y Rosenau (1986).

Para el suelo Alfisol, debido a la presencia de una gran cantidad de gravilla cuarzosa, se descontó la fracción de arena y grava cuarzosa. Para ello, el contenido de agregados en cada tamiz se puso en un matraz de 50 mL y se cubrió con NaOH 0.5 N por 24 h. La muestra se agitó mecánicamente por 2 min a 15 000 ciclos min⁻¹, para disgregar los agregados en partículas básicas; luego estas partículas se desplazaron mediante un flujo constante de agua sobre un tamiz de 0.05 mm. Una vez separada la fracción arenosa, se secó a 105 °C por 24 h, y se descontó de la masa original de supuestos por tamiz.

fertilizer (FN) of 140 kg N ha⁻¹, 131 kg K₂O ha⁻¹ and 200 kg P₂O₅ ha⁻¹. An absolute control of only soil (TS) was included. To calculate the doses of sludge and fertilizer for each soil, 1 kg of soil per pot was considered, as well as the corresponding soil bulk density and depth for sampling. The two soils were sieved through a 2 mm mesh to homogenize the initial material. Once the treatments were established, the pots were completely covered with polyethylene bags and incubated for 30 d at 25 °C and 60-70% field capacity.

The TC and FN treatments were planted with *L. multiflorum* L., the Winter star variety, with a dose of 30 seeds per pot, maintained at 60 % field capacity and 20 °C. The experiment lasted six months, to finally determine the distribution and stability of aggregates in each pot.

Aggregate distribution and stability

The soil of each pot was dried at room temperature (20±2 °C); soil samples were taken and dried in an oven at 40 °C for 24 h (Le Bissonnais, 1996), and passed through a 4 mm sieve. Then 100 g of each sample were transferred to a set of sieves, from larger to smaller: 2; 1; 0.5; 0.25 and 0.05 mm (diameter). The sieves were immersed 15 min in water and shaken at 25 cycles min⁻¹ (Yoder, 1936).

For the Entisol, the percentage of aggregates by size was calculated from the dry mass of the aggregates that remained on each sieve of the total sample. The mean weight diameter (DPM), an indicator of aggregate stability, was determined according to the equation proposed by Kemper and Rosenau (1986).

In the Alfisol soil, due to the presence of a large amount of quartz gravel, the fraction of sand and quartz gravel was not included. For this purpose the content of aggregates on each sieve was placed in a 50 mL jar and covered with 0.5 N NaOH for 24 h. The sample was mechanically shaken for 2 min at 15 000 cycles min⁻¹, to disintegrate the aggregates into basic particles. Then these particles were passed by a constant flow of water through a 0.05 mm sieve. Once separated, the sand fraction was dried at 105 °C for 24 h; it was deducted from the original mass of aggregates obtained by sieving.

Statistical analysis

The experimental design was completely randomized with three replicates per treatment. Data were analyzed by ANOVA and means tested with the Tukey test (p≤0.05). Values were transformed with the expression $\sqrt{(X+0.5)}$ to enter data to the program SAS 8.1 for Windows (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA).

Análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento. Los datos fueron analizados mediante ANDEVA y las medias analizadas con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los valores se transformaron mediante la expresión $\sqrt{(X+0.5)}$ para introducir los datos al programa SAS versión 8.1 para Windows (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Enmiendas en el Entisol

En todos los tratamientos dominaron los macroagregados con diámetros de 1 a 0.25 mm (Cuadro 1). Los tratamientos con mayor proporción de macroagregados fueron LU a 100 y 150 t ha⁻¹ (64.1 y 64.2 %), lo cual causó un aumento promedio del 12.5 %. Al contrario, el testigo TS resultó con la mayor proporción de microagregados (≤ 0.25 mm). La mayor proporción de macroagregados presentado por los tratamientos con aplicaciones de LU (100 y 150 t ha⁻¹), se explica por el aporte de MO que hace el lodo urbano (49.9 % MO) al suelo. En la mayoría de los suelos la MO tiene una función fundamental en la formación de agregados (Tisdall y Oades, 1982; Golchin *et al.*, 1994).

RESULTS AND DISCUSSION

Entisol amendments

The macroaggregates with diameters from 1 to 0.25 mm prevailed in all treatments (Table 1). The treatments with the highest proportion of macroaggregates were LU with 100 and 150 t ha⁻¹ (64.1 and 64.2 %), which caused an average increase of 12.5 %. On the contrary, the TS control recorded the highest proportion of microaggregates (≤ 0.25 mm). The largest proportion of macroaggregates resulting from the LU application treatments (100 and 150 t ha⁻¹) is explained by the contribution of OM to the ground made by urban sludge (49.9 % OM). In most soils OM has a key role in the formation of aggregates (Tisdall and Oades, 1982; Golchin *et al.*, 1994).

The DPM values ranged from 0.25 to 0.47 mm (0.35 mm average). According to Le Bissonnais (1996), DPM values < 0.4 mm indicate a very unstable structural state. As the LU dose increased, soil macroaggregates also did so, and their stability improved, where the treatment at 100 t ha⁻¹ showed the highest DPM value (0.47 mm), equivalent to an increase of 74.1 % compared to TS control. This indicates that the application of municipal sludge not only favored the formation of macroaggregates, but also helped to increase the stability of particles.

Cuadro 1. Distribución de agregados estables al agua (%) y diámetro peso medio (DPM) para los tratamientos con lodo urbano aplicado al suelo Entisol.

Table 1. Distribution of water stable aggregates (%) and mean weight diameter (DPM) for the treatments with urban sludge applied to Entisol soil.

Tratamiento	Abertura tamiz (mm)					Ma	DPM (mm)
	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.05		
LU							
25	0.6	5.1	23.8	24.1	25.7	53.6 c	0.25 c
50	0.5	6.2	25.8	25.8	25.0	58.2 bc	0.28 bc
75	1.6	7.3	26.2	22.8	26.3	57.8 bc	0.31 b
100	9.7	9.6	23.9	20.9	16.0	64.1 a	0.47 a
150	6.6	9.7	30.2	17.7	16.4	64.2 a	0.43 a
TS	0.1	6.4	24.9	25.7	28.8	57.1 c	0.27 bc
TC	0.2	5.7	24.2	24.3	25.4	54.4 c	0.25 c
FN	0.6	7.8	27.4	26.0	28.0	61.8 ab	0.30 bc

LU: lodo urbano (25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹); TS: testigo absoluto; TC: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum*; FN: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum* y fertilización inorgánica; Ma: macroagregados (≥ 0.25 mm). Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) ♦ LU: urban sludge (25, 50, 75, 100 and 150 t ha⁻¹); TS: absolute control; TC: no sludge, planted with *L. multiflorum*; FN: no sludge, planted with *L. multiflorum* and inorganic fertilizer; Ma: macroaggregates (≥ 0.25 mm). Means with different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$).

Los valores de DPM variaron entre 0.25 a 0.47 mm (0.35 mm promedio). Según Le Bissonnais (1996), valores de DPM < 0.4 mm indican un estado estructural muy inestable. A medida que la dosis de LU aumentó, se incrementaron los macroagregados del suelo junto con un mejoramiento de su estabilidad, donde el tratamiento a 100 t ha⁻¹ mostró el valor DPM más alto (0.47 mm), equivalente a un incremento de 74.1 %, con relación al testigo TS. Esto indica que la aplicación de lodos urbanos no sólo favoreció la formación de macroagregados, sino también contribuyó a aumentar la estabilidad de las partículas. El tratamiento FN no mostró diferencias significativas en la proporción de macroagregados con los tratamientos LU a 100 y 150 t ha⁻¹, pero mostró un menor DPM ($p \leq 0.05$). La fertilización inorgánica promovió el desarrollo del sistema radicular, que tiene una función importante en la formación de macroagregados (Miller y Jastrow, 1992), pero no mejoró la estabilidad de los agregados al no incorporar MO.

Las enmiendas con lodos de piscicultura en el Entisol, al igual que los lodos urbanos, muestran un predominio de los macroagregados de 1 a 0.25 mm (Cuadro 2). Hubo un aumento en la proporción de macroagregados con dosis crecientes de lodos: los valores fueron más altos ($p \leq 0.05$) en los tratamientos LP a 100 y 150 t ha⁻¹ (67.4 y 65.9 %). Esto significó un incremento de 18 % en macroagregados con

The FN treatment showed no significant differences in the proportion of macroaggregates with LU treatments at 100 and 150 t ha⁻¹, but showed lower DPM ($p \leq 0.05$). Inorganic fertilization promoted the development of the root system, which has an important role in the formation of macroaggregates (Miller and Jastrow, 1992), but did not improve aggregate stability by not incorporating OM.

The fish farming sludge amendments in Entisol, as well as municipal sludge, show a predominance of macroaggregates from 1 to 0.25 mm (Table 2). There was an increase in the proportion of macroaggregates with increasing doses of sludge. Values were higher ($p \leq 0.05$) in the LP treatments at 100 and 150 t ha⁻¹ (67.4 and 65.9 %). This meant an increase of 18% in macroaggregates with applications of 100 t ha⁻¹ LP, compared to the control TS. The DPM values ranged from 0.26 to 0.50 mm; the highest value (0.50 mm) was with 150 t ha⁻¹ of LP; this is an improvement of 85 % compared to the control TS. Similarly, for urban sludge amendments, FN reached 61.8 % of macroaggregates and its DPM was lower ($p \leq 0.05$) with the LP treatments at 100 and 150 t ha⁻¹.

Salmon farming sludge contain large amounts of OM, which favors the structural aggregation of soils (Mazzarino *et al.*, 1997; Annabi *et al.*, 2007, Salazar and Saldaña, 2007.) In the present study, fish farming sludge showed 20.7 % of OM.

Cuadro 2. Distribución de agregados estables al agua (%) y diámetro peso medio (DPM) para distintos tratamientos con lodo de piscicultura aplicado al suelo Entisol.

Table 2. Distribution of water stable aggregates (%) and mean weight diameter (DPM) for different treatments with fish farming sludge applied to the Entisol soil.

Tratamiento	Abertura tamiz (mm)					Ma	DPM (mm)
	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.05		
LP							
25	0.5	6.9	27.0	22.9	24.6	57.3 cd	0.29 cd
50	0.2	6.1	24.2	25.3	26.7	55.8 d	0.26 d
75	1.0	8.5	27.1	25.7	20.9	62.2 b	0.31 c
100	1.1	9.2	41.8	15.3	14.5	67.4 a	0.37 b
150	11.4	8.8	25.3	20.4	15.1	65.9 a	0.50 a
TS	0.1	6.4	24.9	25.7	28.8	57.1 d	0.27 cd
TC	0.2	5.7	24.2	24.3	25.4	54.4 d	0.25 d
FN	0.6	7.8	27.4	26.0	28.0	61.8 bc	0.30 cd

LP: lodo piscicultura (25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹); TS: testigo absoluto; TC: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum*; FN: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum* y fertilización inorgánica; Ma: macroagregados (≥ 0.25 mm). Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) ♦ LP: fish farming sludge (25, 50, 75, 100 and 150 t ha⁻¹); TS: absolute control; TC: no sludge, planted with *L. multiflorum*; FN: no sludge, planted with *L. multiflorum* and inorganic fertilizer; Ma: macroaggregates (≥ 0.25 mm). Means with different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$).

aplicaciones de 100 t ha⁻¹ de LP, comparado con el testigo TS. Los valores de DPM variaron entre 0.26 a 0.50 mm; el valor más alto (0.50 mm) fue con 150 t ha⁻¹ de LP, esto es una mejora de 85 % con respecto al testigo TS. Similarmente para las enmiendas con lodo urbano, FN alcanzó 61.8 % de macroagregados y su DPM fue menor ($p \leq 0.05$) respecto a los tratamientos LP a 100 y 150 t ha⁻¹.

Los lodos de salmonicultura contienen grandes cantidades de MO, lo que favorece la agregación estructural de los suelos (Mazzarino *et al.*, 1997; Annabi *et al.*, 2007; Salazar y Saldaña, 2007). En el presente estudio, los lodos de piscicultura mostraron 20.7 % de MO.

Las enmiendas con lodos salmonícolas de lago (Cuadro 3) tuvieron un menor efecto en la formación de agregados mayores a 0.25 mm y en su estabilidad. Los tratamientos con este tipo de lodo no presentaron diferencias significativas con el testigo TS. No obstante, una aplicación de 150 t ha⁻¹ aumentó hasta 8.9 % la proporción de macroagregados, junto con un aumento de 11.1 % en su estabilidad. La menor respuesta del lodo LL a la formación y estabilidad de macroagregados obedecería a su menor contenido de MO (18.3 %), comparado con LU (49.9 %) y LP (20.7 %). Además, LL presenta un estado de reducción porque se obtiene bajo una columna de agua de más de 20 m de profundidad, lo que no favorece a

Amendments with lake-salmon sludge (Table 3) had less effect on the formation of aggregates larger than 0.25 mm and on their stability. Treatments with this type of sludge did not differ significantly with the control TS. However, an application of 150 t ha⁻¹ increased up to 8.9 % the proportion of macroaggregates, together with an 11.1 % increase in its stability. The lower response of LL sludge to the formation and stability of macroaggregates is probably due to its lower OM content (18.3 %) compared to LU (49.9 %), and LP (20.7 %). In addition, the LL treatment showed a reduced state because it is obtained under a water column over 20 m deep, so it does not favor the soil microbial and fungus biomass, important in the formation of aggregates (Gupta and Germer, 1988; García-Oliva *et al.*, 2004). However, the treatment with inorganic fertilizer and seed (FN) did not differ from the LL (100 and 150 t ha⁻¹) since fertilization and the root system of *L. multiflorum* sown favored in a similar way the formation and stability of aggregates (Carter, 2004).

Amendments in Alfisol

Table 4 shows that in general the aggregation of this soil was low due to the excessive presence of sand, which varied from 26.1 to 40.1 % (considering micro and

Cuadro 3. Distribución de agregados estables al agua (%) y diámetro peso medio (DPM) para distintos tratamientos con lodo salmonícola lacustre aplicado al suelo Entisol.

Table 3. Distribution of water stable aggregates (%) and mean weight diameter (DPM) for different lake-salmon sludge treatments applied to the Entisol.

Tratamiento	Abertura tamiz (mm)					Ma	DPM (mm)
	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.05		
LL							
25	0.4	6.9	25.7	25.8	26.8	58.9 ab	0.28 ab
50	0.3	6.7	24.6	25.9	27.6	57.5 ab	0.27 ab
75	0.2	7.6	28.9	23.9	24.4	60.6 a	0.29 ab
100	0.2	7.8	28.8	24.3	19.8	61.1 a	0.30 ab
150	0.2	8.6	25.9	27.5	21.1	62.2 a	0.30 ab
TS	0.1	6.4	24.9	25.7	28.8	57.1 ab	0.27 ab
TC	0.2	5.7	24.2	24.3	25.4	54.4 b	0.25 b
FN	0.6	7.8	27.4	26.0	28.0	61.8 a	0.30 a

LL: lodo salmonicultura lacustre (25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹); TS: testigo absoluto; TC: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum*; FN: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum* y fertilización inorgánica; Ma: macroagregados (≥ 0.25 mm). Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) ♦ LL: lake salmon farming sludge (25, 50, 75, 100 and 150 t ha⁻¹); TS: absolute control; TC: no sludge, planted with *L. multiflorum*; FN: no sludge, planted with *L. multiflorum* and inorganic fertilizer; Ma: macroaggregates (≥ 0.25 mm). Means with different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$).

la biomasa microbiana y fungosa del suelo importante en la formación de agregados (Gupta y Germida, 1988; García-Oliva *et al.*, 2004). Sin embargo, el tratamiento con fertilización inorgánica y siembra (FN) no se diferenció de los tratamientos LL (100 y 150 t ha⁻¹), debido a que la fertilización y el sistema radicular del ballico sembrado favorecieron de similar manera la formación y estabilidad de los agregados (Carter, 2004).

Enmiendas en el Alfisol

En el Cuadro 4 se observa que en general la agregación de este suelo fue baja debido a la excesiva presencia de arenas, que variaba de 26.1 a 40.1 % (sumando micro y macroagregados). Las enmiendas con lodos urbanos a 100 y 150 t ha⁻¹ presentaron valores significativamente mayores ($p \leq 0.05$) de macroagregados con respecto a los demás tratamientos (34.1 y 33 %). Enmiendas con 100 t ha⁻¹ lograron 79.5 % de incremento respecto del testigo TS. Los tratamientos con 100 y 150 t ha⁻¹ alcanzaron una mayor ($p \leq 0.05$) DPM, con 0.40 y 0.42 mm, lo que corrobora que esta respuesta positiva es atribuible al mayor aporte de MO (Guerrero *et al.*, 2001; Ellies, 2004; Sandoval *et al.*, 2007). En comparación, los tratamientos LU a 25, 50 y 75 t ha⁻¹ no difirieron significativamente de los tratamientos TS, TC y FN,

macroagregados). The amendments with municipal sludge at 100 and 150 t ha⁻¹ had significantly higher values ($p \leq 0.05$) of macroaggregates with respect to the other treatments (34.1 and 33 %). Amendments with 100 t ha⁻¹ recorded a 79.5 % increase compared to the TS control. Treatments with 100 and 150 t ha⁻¹ reached a higher DPM ($p \leq 0.05$), with 0.40 and 0.42 mm, confirming that this positive response is attributable to the greater contribution of OM (Guerrero *et al.*, 2001; Ellies, 2004; Sandoval *et al.*, 2007). In comparison, LU treatments at 25, 50 and 75 t ha⁻¹ did not differ significantly from treatments TS, TC and FN, which showed lower formation of macroaggregates and little stability.

The CT and FN treatments did not differ significantly in the amount of macroaggregates of the TS control. It therefore appears that there was no great involvement of the root system in the formation of macroaggregates, unlike the Entisol where roots did have a positive effect on the aggregation. Macroaggregate formation and stabilization are stimulated by root growth and soil microbial activity (Carter, 2004), which are essential in improving soil structure (Chan *et al.*, 2003).

The amendments with urban sludge at high doses in the Alfisol showed higher amounts of macroaggregates and better stability, as well as in Entisol. This sludge may improve the physical

Cuadro 4. Distribución de agregados estables al agua (%) y diámetro peso medio (DPM) para distintos tratamientos con lodo urbano aplicado al suelo Alfisol.

Table 4. Distribution of water stable aggregates (%) and mean weight diameter (DPM) for different treatments with urban sludge applied to Alfisol soil.

Tratamiento	Abertura tamiz (mm)					Ma	DPM (mm)
	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.05		
LU							
25	0.0	2.3	7.1	5.8	10.2	15.3 c	0.08 c
50	0.6	7.1	7.3	7.6	13.3	22.5 b	0.14 b
75	0.9	4.7	8.5	9.8	13.9	23.9 b	0.14 bc
100	12.7	10.5	4.5	6.3	6.0	34.1 a	0.40 a
150	13.5	12.4	3.9	3.2	2.9	33.0 a	0.42 a
TS	0.2	2.8	7.3	8.8	11.4	19.0 bc	0.10 bc
TC	0.6	6.4	9.0	4.7	5.6	20.7 b	0.14 bc
FN	1.0	6.3	6.3	6.1	6.4	19.7 bc	0.13 bc

LU: lodo urbano (25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹); TS: testigo absoluto; TC: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum*; FN = sin lodo, sembrado con *L. multiflorum* y fertilización inorgánica; Ma: macroagregados (≥ 0.25 mm). Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) ♦ LU: urban sludge (25, 50, 75, 100 and 150 t ha⁻¹); TS: absolute control; TC: no sludge, planted with *L. multiflorum*; FN = no sludge, planted with *L. multiflorum* and inorganic fertilizer; Ma: macroaggregates (≥ 0.25 mm). Means with different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$).

los cuales mostraron baja formación de macroagregados y poca estabilidad.

Los tratamientos TC y FN no se diferenciaron significativamente en la cantidad de macroagregados del testigo TS. Por tanto, se infiere que no hubo una destacada participación del sistema radicular en la formación de macroagregados, a diferencia del suelo Entisol donde las raíces sí tuvieron un efecto positivo en la agregación. La formación de macroagregados y su estabilización se estimula con el crecimiento radicular y la actividad microbológica del suelo (Carter, 2004), los cuales son esenciales en el mejoramiento de la estructura del suelo (Chan *et al.*, 2003).

Las enmiendas con lodo urbano a dosis altas en el Alfisol presentaron mayor cantidad de macroagregados y mejor estabilidad, al igual que en el Entisol. Estos lodos mejorarían las propiedades físicas del suelo, incluyendo la estabilidad de agregados (Guiding *et al.*, 1988; Pagliai *et al.*, 2004; Annabi *et al.*, 2007). Según Guerrero *et al.* (2001), aportes de hasta 5 % de lodos urbanos aumentan hasta 78 % el DPM respecto a la condición inicial de un suelo con 7.5 % MO, lo que proporcionaría protección del suelo ante la erosión (Roldán *et al.*, 1996).

Las enmiendas con lodos salmonícolas de piscicultura en el Alfisol (Cuadro 5) muestran que hubo un aumento en los macroagregados, respecto del testigo TS. Los valores de DPM fluctuaron entre 0.10 y

properties of soil, including aggregate stability (Guiding *et al.*, 1988; Pagliai *et al.*, 2004; Annabi *et al.*, 2007). According to Guerrero *et al.* (2001), contributions of up to 5 % of municipal sludge increase DPM up to 78 % compared to the initial condition of a soil with 7.5 % OM, which might provide protection to soil against erosion (Roldán *et al.*, 1996).

The amendments with land-farmed salmon sludge in the Alfisol (Table 5) show an increase in macroaggregates with respect to absolute control. The DPM values fluctuated between 0.10 and 0.24 mm, which corresponds to a highly unstable system (Le Bissonnais, 1996). The LP treatments at 75 and 100 t ha⁻¹ differed statistically ($p \leq 0.05$) from the other treatments and the control TS. The value of DPM increased from 0.10 to 0.24 mm as applied doses of sludge increased from 25 to 100 t ha⁻¹, and the last treatment caused the highest increase in stability (140 %). This improvement in the proportion of macroaggregates and their stability can be explained by the contribution of land-farmed salmon sludge OM (20.7%), because it is a physical variable that favors soil aggregation (Annabi *et al.*, 2007).

The amendments with lake-salmon sludge (Table 6) indicate a dominion of macroaggregates, though they did not exceed 25 % of the total sample assessed. The DPM values ranged between 0.10 and 0.29 mm,

Cuadro 6. Distribución de agregados estables al agua (%) y diámetro peso medio (DPM) para distintos tratamientos con lodo salmonícola lacustre aplicado al suelo Alfisol.

Table 6. Distribution of water stable aggregates (%) and mean weight diameter (DPM) for different lake-salmon sludge treatments applied to the Alfisol soil.

Tratamiento	Abertura tamiz (mm)					Ma	DPM (mm)
	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.05		
LL							
25	0.1	2.4	6.2	6.1	14.9	14.7 c	0.10 d
50	2.5	10.0	4.6	6.8	15.1	23.9 a	0.20 b
75	1.9	4.9	5.0	5.1	6.0	16.8 bc	0.13 cd
100	11.1	2.3	6.0	4.8	5.6	24.2 a	0.30 a
150	3.5	7.0	3.3	4.1	4.2	17.9 bc	0.17 bc
TS	0.2	2.8	7.3	8.8	11.4	19.0 abc	0.10 d
TC	0.6	6.4	9.0	4.7	5.6	20.7 ab	0.14 bcd
FN	1.0	6.3	6.3	6.1	6.4	19.7 abc	0.13 bcd

LU: lodo piscicultura (25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹); TS: testigo absoluto; TC: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum*; FN = sin lodo, sembrado con *L. multiflorum* y fertilización inorgánica; Ma: macroagregados (≥ 0.25 mm). Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). ♦ LU: fish farming sludge (25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹); TS: absolute control; TC: no sludge, planted with *L. multiflorum*; FN: no sludge, planted with *L. multiflorum* and inorganic fertilizer; Ma: macroaggregates (≥ 0.25 mm). Means with different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$).

0.24 mm, que corresponden a un sistema muy inestable (Le Bissonnais, 1996). Los tratamientos LP a 75 y 100 t ha⁻¹ difirieron estadísticamente (p≤0.05) de los otros tratamientos y del testigo TS. El valor de DPM aumentó (de 0.10 a 0.24mm) al aplicar dosis crecientes de lodos de 25 a 100 t ha⁻¹, y este último tratamiento produjo el mayor aumento en la estabilidad (140 %). Este mejoramiento en la proporción de macroagregados y en su estabilidad se puede explicar por el aporte de MO del lodo de piscicultura (20.7 %), porque es una variable física que favorece la agregación del suelo (Annabi *et al.*, 2007).

Las enmiendas con lodos salmonícolas lacustres (Cuadro 6) indican un dominio de macroagregados aunque no superaron 25 % del total de la muestra evaluada. Los valores de DMP fluctuaron entre 0.10 y 0.29 mm, que corresponde a un sistema muy inestable (Le Bissonnais, 1996). Los tratamientos LL a 50 y 100 t ha⁻¹ difirieron estadísticamente (p≤0.05) de los otros tratamientos y de TS. Las enmiendas a 100 t ha⁻¹ aumentaron en 27.4 % la proporción de macroagregados respecto de la condición inicial del suelo. Hubo una tendencia al mejoramiento de la estabilidad de los agregados al aplicar dosis crecientes de lodos, donde el tratamiento LL a 100 t ha⁻¹ mostró el valor más alto de DPM (0.29 mm). Este aumento se tradujo en un mejoramiento de 200 % del DPM, que es mejor al límite establecido por Le

which corresponds to a very unstable system (Le Bissonnais, 1996). The LL treatments at 50 and 100 t ha⁻¹ differed statistically (p≤0.05) from the other treatments and TS. Amendments at 100 t ha⁻¹ increased the proportion of macroaggregates by 27.4 % compared to the soil initial condition. Aggregate stability tended to improve by applying increasing doses of sludge, where the LL treatment at 100 t ha⁻¹ showed the highest DPM value (0.29 mm). This increase resulted in an improvement of 200 % of the DPM, which is better than the limit set by Le Bissonnais (1996) for a stable soil. This greater stability resulted in an increase in the average diameter of aggregates, favoring the movement of water and air (Ellies, 2004). The FN treatment recorded favorable responses to aggregation, similar to the higher doses of sludge amended. However, aggregate stability was lower than in the treatments with urban and salmon farming sludge. This is consistent with Bronick and Lal (2005), who noted that the stability of the macroaggregates increased with high contents of OM, being significant in sludge amendments used in this study.

CONCLUSIONS

The amendments with sewage sludge and salmon wastes increased the proportion and stability of

Cuadro 5. Distribución de agregados estables al agua (%) y diámetro peso medio (DPM) para distintos tratamientos con lodo de piscicultura aplicado al suelo Alfisol.
Table 5. Distribution of water stable aggregates (%) and mean weight diameter (DPM) for different treatments with fish farming sludge applied to the Alfisol soil.

Tratamiento	Abertura tamiz (mm)					Ma	DPM (mm)
	4-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.05		
LP							
25	0.5	2.9	7.3	9.4	9.4	20.2 ab	0.10 cd
50	0.6	5.9	9.7	10.5	10.2	26.8 a	0.15 bc
75	2.6	10.7	6.0	6.6	6.4	25.8 ab	0.21 a
100	4.1	10.3	6.9	5.3	5.2	26.6 a	0.24 a
150	3.1	6.7	8.4	6.7	3.6	24.9 ab	0.19 b
TS	0.2	2.8	7.3	8.8	11.4	19.0 b	0.10 d
TC	0.6	6.4	9.0	4.5	5.6	20.7 ab	0.14 bcd
FN	1.0	6.3	6.3	6.1	6.4	19.7 b	0.13 cd

LU: lodo piscicultura (25, 50, 75, 100 y 150 t ha⁻¹); TS: testigo absoluto; TC: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum*; FN: sin lodo, sembrado con *L. multiflorum* y fertilización inorgánica; Ma: macroagregados (≥0.25 mm). Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes (p≤0.05) ♦ LU: Fish farming sludge (25, 50, 75, 100 and 150 t ha⁻¹); TS: absolute control; TC: no sludge, planted with *L. multiflorum*; FN: no sludge, planted with *L. multiflorum* and inorganic fertilizer; Ma: macroaggregates (≥0.25 mm). Means with different letter in a column are statistically different (p≤0.05).

Bissonnais (1996) para un suelo estable. Esta mayor estabilidad se traduce en un aumento del diámetro medio de los agregados favoreciendo el movimiento del agua y del aire (Ellies, 2004). El tratamiento FN presentó respuestas favorables a la agregación, semejantes a las mayores dosis de lodos enmendados. No obstante, la estabilidad de los agregados resultó menor que en los tratamientos con lodos urbanos y de salmonicultura. Esto concuerda con Bronick y Lal (2005), quienes señalan que la estabilidad de los macroagregados aumenta con altos contenidos de MO, siendo significativo en las enmiendas con lodos usados en el presente estudio.

CONCLUSIONES

Las enmiendas con lodos urbanos y salmonícolas aumentaron la proporción y la estabilidad de los macroagregados en el suelo Entisol y Alfisol en un periodo de seis meses. En el Alfisol, la proporción de macro y microagregados no sobrepasó 40 % del total, debido a que la masa de suelo está predominantemente constituida por grava cuarcífera. Esto es importante en las evaluaciones físicas de este suelo, cuyos resultados pueden ser influenciados por esta condición.

La aplicación de lodos urbanos fue más efectiva que las enmiendas con lodos salmonícolas en el mejoramiento de los indicadores de agregación y estabilidad en ambos suelos, en especial con dosis de 100 y 150 t ha⁻¹. Por el contrario, las enmiendas con lodos salmonícolas lacustres fueron menos efectivas, especialmente en el suelo Entisol.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto DIUC 209.123.011-011sp de la Universidad de Concepción, Chile.

LITERATURA CITADA

- Annabi, M., S. Houot, C. Francou, M. Poitrenaud, and Y. Le Bissonnais. 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 413-423.
- Bayhan, K., A. Isisdar, and M. Akgul. 2005. Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a loam soil of a dryland in Turkey. *Soil and Plant* 55: 214-220.
- Bronick, C., and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Carter, M. R. 2004. Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 79: 1-6.
- Celis, J., M. Sandoval, E. Zagal, y M. Briones. 2006. Efecto de la adición de biosólidos urbanos y de salmonicultura sobre la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un suelo patagónico. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 6 (3): 13-25.
- Celis, J., M. Sandoval, and R. Barra. 2008. Plant response to salmon wastes and sewage sludge used as organic fertilizer on two degraded soils under greenhouse conditions. *Chilean J. Agric. Res.* 68: 274-283.
- Celis, J., M. Sandoval, y E. Zagal. 2009. Actividad respiratoria de microorganismo en un suelo patagónico enmendado con lodos salmonícolas. *Arch. Med. Vet.* 41: 275-279.
- Chan, K. Y., D. P. Heenan, and H. B. So. 2003. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: a review. *Aust. J. Exp. Agric.* 43: 325-334.
- Cruces, P., J. Cerda, y M. Ahumada. 1999. Guías de condición para los pastizales de la ecorregión templada húmeda de Aysén. Proyecto FNDR-SAG XI Región de Aysén: Levantamiento para el Ordenamiento de los Ecosistemas de Aysén. Gobierno Regional de Aysén, Ministerio de Agricultura, Servicio Agrícola y Ganadero, Coyhaique, Chile. 137 p.
- Cuevas, J., O. Seguel, A. Ellies, y J. Dörner. 2006. Efecto de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 6: 1-12.
- Ellies, A. 2004. Efecto de la materia orgánica en el suelo. *In: Mora, M. (ed). Residuos orgánicos y su uso en sistemas agroforestales. Simposio de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.* pp: 139-150.
- García-Oliva, F., M. Oliva, and B. Sveshtarova. 2004. Effect of soil macroaggregates crusing on C mineralization in tropical deciduous forest ecosystem. *Plant and Soil* 259: 297-305.
- Golchin, A., J.M. Oades, J.O. Skjemstand, and P. Clarke. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* 32: 1043-1068.
- Guerrero, C., J. Mataix-Solera, J. Navarro-Pedreño, F. García-Orenes, and I. Gómez. 2001. Different patterns of aggregate

—End of the English version—

-----*-----

- stability in burned and restored soils. *Arid Land Res. Manage.* 15: 163-171.
- Guiding, G., A. Pera, M. Giovannetti, G. Poggio, and M. Bertoldi. 1988. Variations of structure and microbial population in a compost amended soil. *Plant and Soil* 106: 113-119.
- Gupta, U., and J. Germida. 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 20: 777-786.
- Kemper, W., and R. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. *In: Klute, A. (ed). Methods of Soil Analysis, Part I. Agronomy Monographs, 9. American Society Agronomy, Madison, WI.* pp: 425-442
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Mazzarino, M., Walter, I., G. Costa, F. Laos, L. Roselli, and P. Satti. 1997. Plant response to fish farming wastes in volcanic soils. *J. Environ. Qual.* 26: 522-528.
- Miller, R.M., and J.D. Jastrow. 1992. Extraradical hyphal development of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in a chronosequence of prairie restorations. *In: Read, D. J. D.H. Lewis, A.H. Fitter, and I.J. Alexander (eds). Mycorrhizas in Ecosystems. CAB International, Cambridge, United Kingdom.* pp: 171-176.
- Oades, J.M., and G. Waters. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.* 29: 815-828.
- Pagliai, M., N. Vignozzi, and S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Tillage Res.* 79:131-143.
- Pérez, C., y J. González. 2001. Diagnóstico sobre el estado de degradación del recurso suelo en el país. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu, Chillán, Chile. 196 p.
- Roldán, A., J. Albadalejo, and J. Thornes. 1996. Aggregate stability changes in a semiarid soil after treatment with different organic amendments. *Arid Soil Res. Rehabilitation* 10: 139-148.
- Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores, y A. Reaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI La Platina, Santiago, Chile. 164 p.
- Salazar, F., and R. Saldaña. 2007. Characterization of manures from fish cage farming in Chile. *Bioresour. Technol.* 98: 3322-3327.
- Sandoval, M., N. Stolpe, E. Zagal, and M. Mardones. 2007. The effect of crop-pasture rotations on the C, N and S contents of soil aggregates and structural stability in a volcanic soil of south-central Chile. *Acta Agr. Scand. Section B-Soil & Plant Science* 57: 255-262.
- Sandoval, M., N. Stolpe, E. Zagal, M. Mardones, and J. Celis. 2008. No-tillage organic carbon contribution and effects on an Andisol structure from the Chilean Andean foothills. *Agrociencia* 42: 139-149.
- Santibáñez, F. 2000. Suelos. *In: Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile-1999. Universidad de Chile (ed). LOM Ediciones, Santiago, Chile.* pp: 203-244.
- Six, J., K. Paustian, E. Elliott, and C. Combrink. 2000. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J*10.8.