

## EFLUENTES LÍQUIDOS DE TAMBO: EFECTOS DE SU APLICACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ARGUJUDOL

SILVIA IMHOFF<sup>1\*</sup>; MARÍA EUGENIA CARRIZO<sup>1</sup>; RAMIRO MARTEL<sup>1</sup>; VALENTÍN LOTTO<sup>2</sup> & OSCAR ZEN<sup>1</sup>

Recibido: 18-11-13

Recibido con revisiones: 07-10-14

Aceptado: 09-10-14

### RESUMEN

La aplicación de efluentes líquidos de tambo (*ELT*) al suelo es una práctica que se está extendiendo rápidamente en la cuenca lechera santafesina. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de aplicar al suelo dosis variables de *ELT* sobre sus propiedades físicas. El ensayo se realizó en un suelo Argiudol típico y consistió de tres tratamientos con tres repeticiones distribuidos en un diseño completamente aleatorizado-testigo, sin aplicación de *ELT* (*T0*), aplicación de  $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (*T80*) y  $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (*T160*) de *ELT*. Se realizaron dos aplicaciones de *ELT*, previo a la siembra del raigrás y del sorgo. Las mediciones se efectuaron antes del pastoreo del raigrás (*M1*) y previo al corte del sorgo (*M2*). Muestras no disturbadas (cilindros) se colectaron para determinar densidad del suelo (*Ds*), distribución de poros por tamaño, intervalo hídrico óptimo (*IHO*) y densidad de suelo crítica (*Dsc*). Muestras inalteradas se extrajeron con pala para evaluar la distribución por tamaño de agregados y el diámetro medio geométrico (*DMG*). La infiltración y conductividad hidráulica se midió con tensioinfiltrómetros. En *M1*, *T80* y *T160* presentaron mayor infiltración y conducción de agua por bio y macroporos. La distribución de agregados por tamaño y el *DMG* no mostraron diferencias entre tratamientos. En *M2* se observó una disminución en *Ds* respecto de *M1* y un incremento de la macroporosidad, principalmente en *T160*. Los tres tratamientos presentaron similar *Dsc* pero con diferente rango de variación de *Ds* y porcentaje de casos registrados fuera del *IHO*. Los indicadores presentaron diferente sensibilidad para identificar alteraciones de la estructura del suelo inducidas por la aplicación de *ELT*. La interacción suelo-cultivo-condiciones atmosféricas ejerció notable influencia sobre los cambios ocurridos en las propiedades físicas, por lo que es necesario realizar estudios a largo plazo para corroborar los resultados de este estudio.

**Palabras clave.** Conductividad hidráulica, distribución de agregados, densidad de suelo, intervalo hídrico óptimo.

## DAIRY LIQUID MANURE: EFFECTS ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES IN AN ARGUJUDOL

### ABSTRACT

The application of dairy cattle slurry (*DCS*) to the soil is a practice that is spreading quickly in the milkmaid basin of Santa Fe. The objective of this study was to evaluate the effect of adding several rates of *DCS* on the soil physical properties. The experiment was carried out on a Typic Argiudoll and consisted of three treatments with three replications randomly distributed: control, without *DCS* (*T0*), application of  $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (*T80*) and  $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (*T160*) of *DCS*. The *DCS* was spread before seeding ryegrass and sorghum. Measurements were performed before grazing the ryegrass (*M1*) and before harvesting the sorghum (*M2*). Undisturbed soil samples (cylinders) were collected to determine soil bulk density (*Bd*), pore size distribution, least limiting water range (*LLWR*) and soil critical bulk density (*Bdc*). Undisturbed soil samples were also collected with a shovel to evaluate the size aggregates distribution and the mean geometric diameter (*MGD*). Water infiltration and hydraulic conductivity were measured with tension infiltrometers. Treatments *M1*, *T80* and *T160* showed higher water infiltration and conduction through bio and macropores. The size aggregates distribution and the *MGD* did not show significant differences among treatments. In *M2*, a *Bd* decrease and a macroporosity increase was observed, mainly in *T160*. The three treatments showed similar *Bdc*, but with a different range of variation of *Bd* and percentage of cases registered outside of the *LLWR*. The evaluated indicators showed different sensitivity to identify alterations in soil structure induced by the application of *DCS*. The soil-crop-weather interaction notably influenced the changes of the soil physical properties. Therefore, it is necessary to carry out long-term studies to corroborate these results.

**Key words.** Water conductivity, aggregates distribution, soil bulk density, least limiting water range.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrarias (Universidad Nacional del Litoral). Kredder 2805, Esperanza (3080), Santa Fe. <sup>2</sup> Profesional independiente.

\*Autor de contacto: simhoff@fca.unl.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

La región central de la provincia de Santa Fe forma parte de una de las cuencas lecheras más importantes de la Argentina. En esta región, se ha producido un aumento en la intensificación de los sistemas lecheros con incrementos en la producción de leche, pero también en el volumen de desechos y efluentes en las instalaciones de ordeño y corrales.

Una consecuencia negativa de la intensificación de los sistemas lecheros es la degradación físico-química de los suelos debido al pisoteo intensivo y al escaso reciclado de nutrientes (Díaz Zorita *et al.*, 2002). El deterioro de la estructura edáfica de los suelos del centro de Santa Fe se caracteriza, entre otros aspectos, por la alteración del tamaño de los agregados y la reducción de la porosidad total, fundamentalmente de la macroporosidad (Imhoff *et al.*, 2010). Esto tiene consecuencias negativas directas sobre la captación y movimiento del agua en el suelo (Ghiberto *et al.*, 2007). Como consecuencia es frecuente la formación de costras y la densificación de la capa superficial del horizonte A, siendo elevada la resistencia del suelo a la penetración de las raíces y la permeabilidad baja-moderada (Pilatti *et al.*, 2006; Ghiberto *et al.*, 2007; Imhoff *et al.*, 2010).

Para recuperar la calidad estructural del suelo diversos autores indican que se debe incrementar el contenido de materia orgánica del suelo y de cationes responsables de la formación y estabilización de los agregados, ya que así se mejora la porosidad total y la macroporosidad del suelo y, como consecuencia, se disminuye su densidad ( $D_s$ ), aumenta la tasa de infiltración y la retención de agua, además de permitir una adecuada aireación (Aggelides & Londra, 1999; Kay & Angers, 2000). Por esta razón, es de suma importancia encontrar alternativas que permitan devolver al suelo cantidades elevadas de materia orgánica y/o iones que aumenten la estabilidad estructural de los suelos.

Los efluentes líquidos de tambo (*ELT*) pueden contener una significativa cantidad de materia orgánica y nutrientes (Joshi *et al.*, 1994). Esto los convierte en un recurso potencialmente adecuado para lograr la recuperación física de los suelos. La incorporación de residuos orgánicos sólidos al suelo causó disminución de su densidad, aumento de la porosidad, infiltración, conductividad hidráulica, diámetro de agregados y contenido de agua disponible (Celik *et al.*, 2004; Feng *et al.*, 2005; Khan *et al.*, 2007). Sin embargo, algunos estudios reportaron aumento del flujo preferencial, lo que puede favorecer la lixiviación de nitrógeno y contaminación del agua subterránea cuando la práctica es mal realizada (Woodard *et al.*, 2002).

A pesar de la relevancia de la temática, en la Argentina aún es escasa la información sobre la alteración que experimentan las propiedades físicas del suelo cuando se le adicionan cantidades variables de *ELT*. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios ocasionados por la aplicación de diferentes dosis de *ELT* sin depurar en las propiedades físicas relacionadas con la estructura y con el movimiento del agua en un suelo Argiudol típico de la pampa llana santafesina.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en un establecimiento lechero representativo de la cuenca lechera santafesina (Argentina), ubicado en la localidad de Esperanza (31°26'S y 61°00'W). El clima de la región es mesotérmico subhúmedo-húmedo con precipitaciones y temperatura medias anuales entre 800-900 mm y 18-19 °C (Bianchi & Cravero, 2012). Las precipitaciones registradas durante el estudio (2009-2010) en los tres primeros meses, es decir abril, mayo y junio presentaron precipitaciones muy inferiores a lo normal, al igual que agosto. Los meses de julio, septiembre, noviembre, diciembre y febrero registraron valores muy por encima de la media para el lugar, mientras que octubre y enero no difirieron de la media (detalles en Gambaudo *et al.*, 2014).

Tabla 1. Propiedades químicas del suelo estudiado.

Table 1. Chemical properties of the studied soil.

<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Nt</i>	<i>MO</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>CIC</i>
	dS m <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>				cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		
5,1	0,72	0,13	2,6	17	5	6,8	1,5	0,4	0,7	13,2

*CE*: conductividad eléctrica; *Nt*: nitrógeno total; *MO*: materia orgánica; *P*: fósforo disponible; *S*: azufre disponible; *Ca*: calcio intercambiable; *Mg*: magnesio intercambiable; *Na*: sodio intercambiable; *K*: potasio intercambiable; *CIC*: capacidad de intercambio catiónico.

El suelo está clasificado como Argiudol típico serie Esperanza, bien drenado y textura franco limosa, con 26% de arcilla, 69% de limo y 5% de arena en el horizonte A (Mosconi *et al.*, 1981). La caracterización química se muestra en la Tabla 1.

El lote donde se estableció el ensayo se encontraba con una pastura de alfalfa degradada (*Medicago sativa* L.), que fue secada con herbicida. En el mismo año (2009) se realizaron dos aplicaciones de *ELT*, una a fines de marzo previa a la siembra de raigrás anual (*Lolium multiflorum* Lem.) y la otra, en noviembre, posterior a la emergencia de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench) doble propósito. Para establecer la dosis más elevada a aplicar se tuvo en cuenta la demanda de nutrientes (*N*) de los cultivos y se realizó, en ambos casos, un análisis previo del *ELT*. La dosis intermedia fue establecida en el 50% de la más elevada. Los tres tratamientos (*TO*: testigo, *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) se dispusieron en parcelas de 40 m de largo por 4 m de ancho, distribuidas al azar con tres repeticiones. La biomasa vegetal total producida por la pastura de raigrás y el cultivo de sorgo fue evaluada y también el porcentaje de materia seca de cada cultivo con la finalidad de calcular la cantidad de materia seca total producida. Información detallada se presenta en Gambaudo *et al.* (2014).

El efluente aplicado estaba compuesto por las aguas servidas con desechos sólidos (materia fecal, restos de alimentos y barro) y líquidos (orina y agua del lavado de los pisos, sin incluir el agua de lavado del sistema de ordeñe que se deriva a otra fosa). El análisis de la calidad del agua indicó un valor de *RAS* = 9,77 y *CE* = 127 μS cm<sup>-1</sup>, que corresponde por el grado de riesgo sódico y salino a *C1-S1* casi en el límite con *C1-S2*, siendo apta para riego. La composición del *ELT* aplicado se indica en la Tabla 2. Las determinaciones fueron realizadas en el laboratorio de Producción Animal de INTA Rafaela, siguiendo la metodología de AOAC (1990). Las aplicaciones se realizaron con un equipo estercolero de caída por gravedad.

Las evaluaciones de las propiedades físicas del suelo se realizaron en dos momentos: previo al primer pastoreo del raigrás (*M1*) y antes del corte del cultivo de sorgo (*M2*) para evitar el efecto de compactación por pisoteo y de la maquinaria, respectivamente. En ambos casos el suelo se encontraba con un contenido hídrico cercano a capacidad de campo

(± 0,30 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>). Se midió la infiltración y la conductividad hidráulica (*K*) con infiltrómetros de tensión (Perroux & White, 1988), en el horizonte superficial, efectuando 9 repeticiones en las tensiones de 0, 0,15 y 0,3 kPa. *K* se determinó utilizando la metodología propuesta por Ankeny *et al.* (1991). Las tensiones de 0,15 y 0,3 kPa fueron aplicadas consecutivamente para excluir del proceso de transporte poros de radio equivalente mayores que 1000 y 500 μm respectivamente, de acuerdo con la teoría de capilaridad.

El flujo de agua por macroporos mayores a 1000 μm de radio (ecuación 1) y 500 μm de radio (ecuación 2), expresada como porcentaje de *flujo*, fue calculado según Ghiberto *et al.* (2007):

$$\% \text{flujo}_{p > 1000} = 100 - [(K_{0,15}/K_0) * 100] \quad (1)$$

donde: *K*<sub>0</sub> y *K*<sub>0,15</sub> son los valores de *K* (mm h<sup>-1</sup>) a las tensiones de 0 y 0,15 kPa respectivamente, para los distintos tratamientos.

$$\% \text{flujo}_{p > 500} = 100 - [(K_{0,30}/K_0) * 100] \quad (2)$$

donde: *K*<sub>0</sub> y *K*<sub>0,30</sub> son las *K* (mm h<sup>-1</sup>) a las tensiones de 0 y 0,30 kPa respectivamente, para los distintos tratamientos.

La diferencia en la capacidad de conducción de agua de los macroporos mayores a 1000 μm de radio (% *D<sub>flujo</sub>*) fue calculada con la ecuación (3) (Ghiberto *et al.*, 2007):

$$\% D_{\text{flujo}} = 100 - [(K_{TO}/K_{TO,15}) / (K_E - K_{E,15}) * 100] \quad (3)$$

donde: *K*<sub>TO</sub> y *K*<sub>TO,15</sub>; *K*<sub>E</sub> y *K*<sub>E,15</sub> son los valores de *K* (mm h<sup>-1</sup>) a las tensiones de 0 y 0,15 kPa en los sitios testigo (*TO*) y con efluente (*E*) respectivamente, para cada una de los dosis (*T80* y *T160*).

El porcentaje de diferencia de *K*<sub>0</sub> del sitio con efluente respecto al testigo (*TO*) a la tensión 0 kPa (% *DKO*) se calculó utilizando la ecuación (4) (Ghiberto *et al.*, 2007):

$$\% DKO = (1 - K_{TO}/K_E) * 100 \quad (4)$$

Tabla 2. Caracterización química del efluente líquido de tambo adicionado al suelo en la primera y segunda aplicación.  
Table 2. Chemical characterization of the dairy cattle slurry added to the soil in the first and second application.

Aplicación	<i>pH</i>	<i>CE</i> (dS m <sup>-1</sup> )	<i>ST</i>	<i>MO</i>	<i>Nt</i>	<i>P</i> <i>K</i> <i>Ca</i> <i>Mg</i> <i>Na</i> (mg 100 mL <sup>-1</sup> )				
						<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>
1 <sup>a</sup>	7,7	0,05	530	260	504	0,6	111,0	8,4	9,8	51,3
2 <sup>a</sup>	6,5	0,07	2080	1040	650	14,7	143,1	54,1	24,6	44,4

*CE*: conductividad eléctrica; *ST*: sólidos totales; *MO*: materia orgánica; *Nt*: nitrógeno total; *P*: fósforo; *K*: potasio; *Ca*: calcio; *Mg*: magnesio; *Na*: sodio.

donde:  $K_{TO}$  y  $K_{E}$  son las  $K$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ) a la tensión de 0 kPa en los sitios testigo ( $TO$ ) y con efluente ( $E$ ) para cada tratamiento ( $T80$  y  $T160$ ), respectivamente.

De cada parcela se extrajeron muestras no perturbadas con pala para determinar la distribución de agregados por tamaño en seco en  $M2$ . Las muestras se secaron al aire durante 36 horas, luego cada muestra de 1000 gramos fue arrojada en bolsas de polietileno desde una altura de 2 metros (Díaz Zorita *et al.*, 2002). Para el estudio se utilizaron agregados menores a 16 mm. Las muestras se fraccionaron utilizando una torre de nueve tamices (13,4; 11,1; 7,93; 6,35; 2; 1; 0,5; 0,25 y 0,125 mm) y un agitador de vibración durante 1 minuto a una frecuencia aproximada de 50 Hz. El material retenido en cada tamiz fue pesado y corregido a peso seco en estufa a 105 °C.

A partir de los datos se obtuvo la distribución de los agregados en los diversos tamices y se calculó el diámetro medio geométrico ( $DMG$ ) (ecuación 5) de acuerdo a la metodología descripta por White (1993):

$$DMG = \sum xi * Wi \quad (5)$$

donde:  $x_i$  es el diámetro medio de la fracción  $i$  que corresponde al punto medio entre el tamiz en el cual la muestra ha sido retenida y el inmediatamente superior,  $W_i$  es la proporción del total de la muestra que quedó retenida en ese tamiz.

Muestras de suelo con estructura no perturbada, con cilindros de 5 cm de altura por 5 cm de diámetro ( $98 \text{ cm}^3$  aproximadamente), en el horizonte A (0-10 cm;  $n=18$ ), se colectaron en  $M1$  para efectuar las siguientes determinaciones: densidad de suelo ( $Ds$ ) (Blake & Hartge, 1986), curva de retención hídrica ( $CRH$ ), curva de resistencia a la penetración ( $CRP$ ) e intervalo hídrico óptimo ( $IHO$ ) según Pires da Silva *et al.* (1994). En  $M2$  sólo se tomaron 12 muestras no perturbadas (cilindros) por tratamiento, a igual profundidad, para evaluar la ocurrencia de alteraciones en  $Ds$  debido a que los límites del  $IHO$  no se alteran en el corto plazo (Pires da Silva *et al.*, 1994).

Las muestras fueron saturadas por elevación gradual de una lámina de agua, se pesaron para obtener el contenido hídrico en saturación ( $\theta_s$ ) y posteriormente se equilibraron en los siguientes potenciales mátricos ( $\Psi$ ): -0,003 y -0,006 MPa en una mesa de tensión, -0,01, -0,03, -0,1, y -1,5 MPa por medio de presiones aplicadas en placas porosas (Klute & Dirksen, 1986). Cuando las muestras llegaron al equilibrio fueron pesadas y en cada una se midió resistencia a la penetración ( $RP$ ) utilizando un penetrómetro electrónico que consta de un cono de 60° de ángulo y 4 mm de diámetro basal. Inmediatamente las muestras fueron secadas en estufa a 105 °C para la determinación del contenido de agua y  $Ds$ .

Para la determinación de las  $CRH$  fue establecida la relación funcional entre el potencial mátrico ( $\Psi$ ) y el contenido

volumétrico de agua ( $\theta$ ) por medio de la ecuación (6):

$$\theta = a * \Psi^b \quad (6)$$

donde:  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $\Psi$  es el potencial mátrico (MPa),  $a$  y  $b$  son los parámetros de ajuste.

A partir de la  $CRH$  se determinó la porosidad total, proporción de macro ( $\geq 75 \mu\text{m}$ ), meso (30-75  $\mu\text{m}$ ) y microporos ( $< 30 \mu\text{m}$ ). Los distintos tamaños de poros fueron determinados de acuerdo a la clasificación de poros propuesta por Kay & Angers (2000).

La relación funcional entre  $RP$ ,  $Ds$  y  $\theta$ , identificada como curva de resistencia del suelo ( $CRS$ ), fue ajustada por medio del modelo no lineal propuesto por Buscher (1990), utilizando los procedimientos descriptos por Pires da Silva *et al.* (1994) (ecuación 7).

$$RP = c * \theta^d * DS^e \quad (7)$$

donde:  $RP$  es la resistencia del suelo a la penetración (MPa),  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $Ds$  es la densidad del suelo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) y  $c$ ,  $d$ ,  $e$  son parámetros de ajuste.

A partir de las  $CRH$  y  $RP$  fue cuantificado el  $IHO$  para cada tratamiento. El valor de dicho intervalo se calcula como la diferencia existe entre el mayor contenido hídrico correspondiente a los límites inferiores (punto de marchitez permanente o  $RP$ ) y el menor relacionado a los límites superiores (porosidad de aireación o capacidad de campo). El  $IHO$ , por ser un indicador estable, se determinó sólo una vez, procediendo a monitorear su alteración midiendo la variable  $Ds$ .

Para los ajustes de las curvas de resistencia, de retención de agua y del intervalo hídrico óptimo se utilizó el algoritmo propuesto por Leão *et al.* (2005).

El análisis estadístico se realizó utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013). El efecto de los ELT sobre las propiedades físicas se evaluaron mediante ANOVA y la comparación de medias mediante el Test de Tukey con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presenta la cantidad de  $MO$  y nutrientes adicionados al suelo en cada aplicación ( $1ra$  y  $2da$ ) y en cada tratamiento.

La cantidad de  $MO$  adicionada fue diferente en ambos momentos debido a la variación en el porcentaje de materia seca del efluente. Especialmente en la  $2da$ , el efluente aportó cantidades importantes de  $MO$ , semejante en canti-

Tabla 3. Cantidad de nutrientes adicionados al suelo en la primera (1ra) y segunda (2da) aplicación con las diferentes dosis de efluente líquido de tambo.

Table 3. Amount of nutrients added to the soil on the first (1st) and second (2nd) application with the different rates of dairy cattle slurry.

Aplicación	Dosis	<i>MO</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>
		<i>kg ha<sup>-1</sup></i>				
<i>1ra</i>	<i>T80</i>	208	7	8	41	89
	<i>T160</i>	416	13	16	82	178
<i>2da</i>	<i>T80</i>	1664	43	20	35	114
	<i>T160</i>	3328	87	39	71	229

*MO*: materia orgánica; *Ca*: calcio; *Mg*: magnesio; *Na*: sodio; *K*: potasio; *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

dad a lo que se incorporaría al sistema con el rastrojo de un trigo de buen rendimiento, aunque de calidad muy superior. Esta es una contribución muy importante para poder mantener o elevar los valores de *MO* de los suelos, sobre todo en aquellos sistemas en que la cantidad remanente de residuos de cosecha es escasa, como los sistemas lecheros en que muchos cultivos se destinan a silaje. La adición de *ELT* no causó modificaciones importantes en las demás propiedades químicas del suelo, lo que se discute detalladamente en Gambaudo *et al.* (2014).

#### Ingreso y movimiento de agua en el suelo

La infiltración mostró diferencias entre los tratamientos con efluentes respecto de *T0* sólo a la tensión 0 kPa en ambos momentos de muestreo (Tabla 4), pero no hubo diferencias entre *T80* y *T160*. Esto sugiere que hubo un efecto positivo del efluente, que se evidencia en un aumento de la infiltración en *T80* y *T160* de aproximadamente 7 mm h<sup>-1</sup> en la tensión 0 respecto de *T0*.

Los valores de *I* en el tratamiento *T0*, tanto en *M1* como *M2* son similares a los medidos por Pilatti *et al.* (2006) para diversas series de suelos de Santa Fe que se encontraban

cultivados y con escasa o nula cobertura vegetal, mientras que los valores registrados en *T80* y *T160* se aproximan a los determinados en suelos que presentaban abundante cobertura de rastrojos y mejor agregación. El incremento verificado, aunque reducido en valor absoluto, es muy importante sobre todo en suelos limosos con baja estabilidad estructural que fácilmente se sellan dificultando la entrada de agua en el suelo. En la Tabla 5 se presentan los valores de conductividad hidráulica (*K*) para distintas tensiones y tratamientos.

Los valores de *K* en las tensiones de 0 y 0,15 kPa también fueron significativamente mayores en *T80* y *T160* que en *T0*, especialmente en *M1*. Los valores registrados en *T80* y *T160* fueron similares a los encontrados por Ghiberto *et al.* (2007) para suelos similares que no habían sido irrigados, mientras que los valores de *K* en *T0* se asemejaron a los medidos en suelos que habían sido regados con aguas bicarbonatadas sódicas, lo que había inducido degradación de la estructura del suelo.

La aplicación de *ELT* contribuyó a aumentar la cantidad de poros continuos grandes. Otros trabajos también demostraron que hubo un efecto positivo de los efluentes

Tabla 4. Infiltración (*I*, mm h<sup>-1</sup>) en diferentes tensiones en función de las dosis de efluente líquido de tambo aplicado previo al primer pastoreo de raigrás (*M1*) y antes del corte del sorgo (*M2*).

Table 4. Infiltration (*I*, mm h<sup>-1</sup>) at different tensions as a function of the rates of dairy cattle slurry applied before the first grazing of ryegrass (*M1*) and before cutting the sorghum (*M2*).

Tensión (kPa)	<i>T0</i>		<i>T80</i>		<i>T160</i>	
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>
0	20,3 a	19,3 a	27,9 b	26,4 b	26,7 b	24,8 ab
0,15	18,1 a	12,3 a	20,1 a	14,0 a	19,9 a	14,3 a
0,3	18,7 a	10,9 a	18,9 a	10,0 a	19,4 a	10,2 a

Letras distintas indican diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$ ) para cada momento de muestreo. *T0*: 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

Tabla 5. Conductividad hidráulica ( $K$ , mm h<sup>-1</sup>) en diferentes tensiones en función de las dosis de efluente líquido de tambo aplicado previo al primer pastoreo de raigrás ( $M1$ ) y antes del corte del sorgo ( $M2$ ).

Table 5. Hydraulic conductivity ( $K$ , mm h<sup>-1</sup>) at different tensions as a function of the rates of dairy cattle slurry applied before the first grazing of ryegrass ( $M1$ ) and before cutting the sorghum ( $M2$ ).

Tensión (kPa)	$T0$		$T80$		$T160$	
	$M1$	$M2$	$M1$	$M2$	$M1$	$M2$
0	16,7 a	17,7 a	25,1 b	28,0 b	23,9 b	22,5 b
0,15	13,9 a	11,5 a	17,1 b	13,8 a	17,0 b	12,7 a
0,3	13,1 a	8,1 a	12,5 a	8,5 a	12,3 a	8,6 a

Letras distintas indican diferencias significativas ( $\pm = 0,05$ ) para cada momento de muestreo.  $T0$ : 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>;  $T80$ : 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>;  $T160$ : 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

de tambo sobre la conductividad hidráulica saturada debido al incremento en el secuestro de carbono en estos suelos (Khan *et al.*, 2007). Aggelides & Londra (1999) y Khan *et al.* (2007) indicaron que el agregado de compost orgánico mejoró la conductividad hidráulica, disminuyó la densidad del suelo y aumento la porosidad total.

El movimiento de agua que ocurrió por poros mayores a 1000  $\mu\text{m}$  en  $M1$  aumentó significativamente en los tratamientos con aplicación de efluente (Tabla 6), aunque no hubo diferencias significativas entre  $T80$  y  $T160$ . Wu *et al.* (2003), quienes trabajaron con enmiendas sólidas provenientes de residuos de tambo, tampoco encontraron diferencias en la porosidad y conductividad hidráulica entre las distintas dosis aplicadas.

En  $M1$  el flujo de agua por poros con radio entre 1000 y 500  $\mu\text{m}$  fue notablemente mayor en  $T80$  y  $T160$  (18,5 y 19,6%) que en  $T0$  (4,8%). En  $M2$  se mantuvo la tendencia observada en  $M1$  respecto a la diferencia entre las tensiones (18,8 y 18,5%), pero la diferencia con  $T0$  (19,4%) fue prácticamente nula. Esto sugiere que el sistema radicular del cultivo de sorgo ejerció gran influencia sobre la

distribución y continuidad de los poros de mayor tamaño del suelo. La presencia de estos poros es de gran importancia para que se produzca un rápido ingreso del agua al suelo, evitando problemas de erosión en áreas onduladas y de encharcamiento en áreas planas.

La diferencia de flujo ( $\%D_{\text{flujo}}$ ) respecto del testigo fue superior en ambos momentos de muestreo en  $T80$  (Tabla 6), indicando que en este tratamiento la conducción de agua por los macroporos > 1000  $\mu\text{m}$  fue mayor. Dado que la distribución de poros es similar en los dos tratamientos, una posible explicación para estos resultados es que en  $T80$  los poros presenten, por alguna razón no determinada en este estudio, una mayor conectividad. El  $\%DK0$  del sitio con efluente respecto al testigo también fue mayor en  $T80$  que en  $T160$  (Tabla 6). Estos resultados sugieren que el efluente ejerció un efecto positivo sobre el suelo, probablemente estimulando la generación de poros grandes bien interconectados que son responsables tanto del ingreso como del movimiento rápido del agua en el suelo.

Tabla 6. Movimiento de agua en función de las dosis de efluente líquido de tambo aplicado previo al primer pastoreo de raigrás ( $M1$ ) y antes del corte del sorgo ( $M2$ ).

Table 6. Movement of water as a function of the rates of dairy cattle slurry applied before the first grazing of ryegrass ( $M1$ ) and before cutting the sorghum ( $M2$ ).

Variables	$T0$		$T80$		$T160$	
	$M1$	$M2$	$M1$	$M2$	$M1$	$M2$
$\%flujo_{p>1000}$	16,6	35,2	31,8	50,8	29,1	43,4
$\%flujo_{p>500}$	21,4	54,6	50,3	69,6	48,7	61,9
$\%D_{\text{flujo}}$	—	—	65,3	56,1	60,1	35,8
$\%DK0$	—	—	33,6	36,7	30,2	21

$T0$ : 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>;  $T80$ : 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>;  $T160$ : 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

### Agregación del suelo

La distribución por tamaño de agregados no mostró diferencias significativas entre tratamientos (Fig. 1). El 56,5% de agregados se obtuvo en el rango de 1 a 8 mm mientras que el 34,6% correspondieron a agregados menores a 1 mm.

El tamaño de agregados menor a 1 mm es considerado inadecuado porque favorece condiciones de menor aereación, mayor resistencia mecánica e incrementos en la tortuosidad de los poros del suelo, factores que pueden limitar el desarrollo de los cultivos (Braunack & Dexter, 1989b). *T160* presentó mayor proporción de estos agregados pequeños. Por lo tanto, y concordando con la bibliografía, esos agregados pequeños pudieron haber sido la causa de que en *T160* los valores de %  $D_{flujo}$  y %  $DK0$  sean menores que en *T80*.

Respecto al *DMG* no hubo diferencias entre los distintos tratamientos (Tabla 7). Los valores de *DMG* así como los *CV* se encuentran dentro de los parámetros normales para el adecuado almacenamiento y flujo de agua e iones, aireación y resistencia mecánica, según lo determinado por Braunack & Dexter (1989a). Otros autores encontraron diferencias entre los tratamientos cuando se aplicó compost al suelo, cuyo porcentaje de *MO* fue próximo al 50% (Angelides & Londra, 1999). La falta de respuesta en este ensayo puede atribuirse a que el porcentaje de *MO* del efluente no fue tan elevado o la duración del ensayo no fue lo suficientemente prolongada para generar cambios.

### Densidad del suelo

Contrariamente a lo esperado, la densidad del suelo (*Ds*) no disminuyó con la aplicación de *ELT*. No hubo dife-

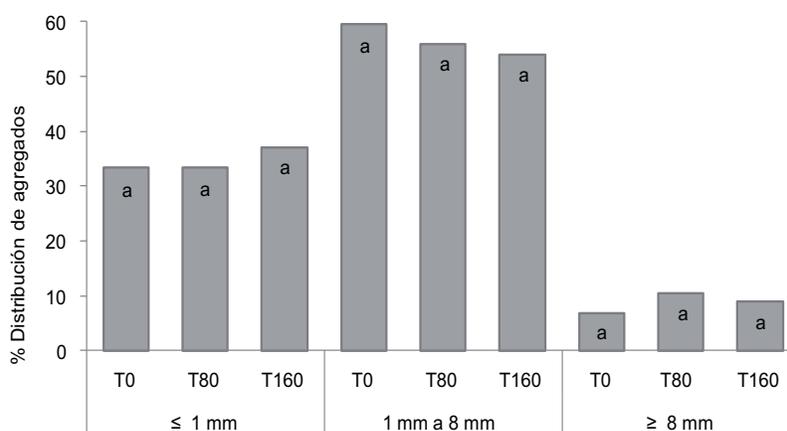


Figura 1. Distribución por tamaño de agregados (%) en función de las dosis de efluente líquido de tambo aplicado (*T0*: 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Letras distintas indican diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$ ).

Figure 1. Aggregate size distribution (%) as a function of the dairy cattle slurry rates: *T0*: 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Different letters indicate significant differences ( $\alpha = 0.05$ ).

Tabla 7. Diámetro medio geométrico (*DMG*, mm) de los agregados, desvío estándar (*DE*) y coeficiente de variación (*CV*) en función de las dosis de efluente líquido de tambo (*ELT*) aplicado.

Table 7. Geometric mean diameter (*GMD*, mm) of aggregates, standard deviation (*SD*) and coefficient of variation (*CV*) as a function of the applied rates of dairy cattle slurry.

Dosis <i>ELT</i>	<i>DMG</i>	<i>DE</i>	<i>CV</i>
<i>T0</i>	4,64 a	0,31	11,47
<i>T80</i>	4,94 a	0,45	15,85
<i>T160</i>	4,63 a	0,3	11,07

Letras distintas indican diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$ ). *T0*: 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

rencias significativas entre los tratamientos en ninguno de los momentos evaluados (*M1* y *M2*) (Tabla 8).

La falta de efecto positivo del *ELT* sobre *Ds* probablemente se debió a la compactación realizada por el paso del equipo estercolero, dado que la aplicación se realizó cuatro días después de una lluvia de cerca de 25 mm, estando el suelo un poco húmedo, debido a la necesidad de efectuar la siembra por la escasa humedad almacenada. Estos resultados destacan la importancia de realizar las operaciones culturales (siembra, controles de malezas, plagas, enfermedades) con humedad adecuada a efectos de evitar la densificación adicional del suelo. Imhoff *et al.* (2012) demostraron que tanto la susceptibilidad a la compactación como la presión de pre-consolidación (capacidad de carga o soporte) de los suelos de Santa Fe dependen de la humedad al momento de aplicación de la carga, entre otras propiedades intrínsecas, lo que corrobora los resultados obtenidos en este estudio.

En el segundo muestreo aunque no se observaron diferencias entre los tratamientos (Tabla 8), los valores de *Ds* disminuyeron notablemente (14, 16 y 20% para *T0*, *T80*

y *T160*) respecto de los valores registrados en el primer muestreo. Esto indica que hubo un efecto de descompactación del suelo que fue mediado principalmente por el sistema radicular profuso del sorgo y por el efluente, según lo sugiere la tendencia creciente de la disminución de *Ds*.

Numerosos trabajos mencionan que ocurre disminución en la densidad del suelo con posterioridad a la aplicación de enmiendas orgánicas debido al aumento en la actividad biológica (Feng *et al.*, 2005; Khan *et al.*, 2007; Celik *et al.*, 2004) y del cultivo de gramíneas con sistemas radiculares profusos (Gambaudo *et al.*, 2014).

#### Distribución del tamaño de poros

La marcada diferencia entre los valores de *Ds* registrados en *M1* y *M2* se reflejó en una distribución diferente del tamaño de poros en cada tratamiento (Fig. 2). En *M1* los valores de macroporosidad no presentaron diferencias entre tratamientos y fueron menores a los valores registrados en *M2*. El incremento que se produjo fue de 7, 9 y 12%, para *T0*, *T80* y *T160*, respectivamente.

Tabla 8. Densidad del suelo (*Ds*, g cm<sup>-3</sup>) en función de las dosis de efluente líquido de tambo aplicado previo al primer pastoreo de raigrás (*M1*) y antes del corte del sorgo (*M2*).

Table 8. Soil bulk density (*Bd*, g cm<sup>-3</sup>) as a function of the rates of dairy cattle slurry applied before the first grazing of ryegrass (*M1*) and before cutting the sorghum (*M2*).

Momentos de muestreo	<i>T0</i>	<i>T80</i>	<i>T160</i>
<i>M1</i>	1,40 a (0,06)	1,44 a (0,04)	1,47 a (0,04)
<i>M2</i>	1,22 a (0,03)	1,21 a (0,04)	1,18 a (0,04)

Letras distintas indican diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$ ). Valores entre paréntesis corresponden al desvío estándar. *T0*: 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

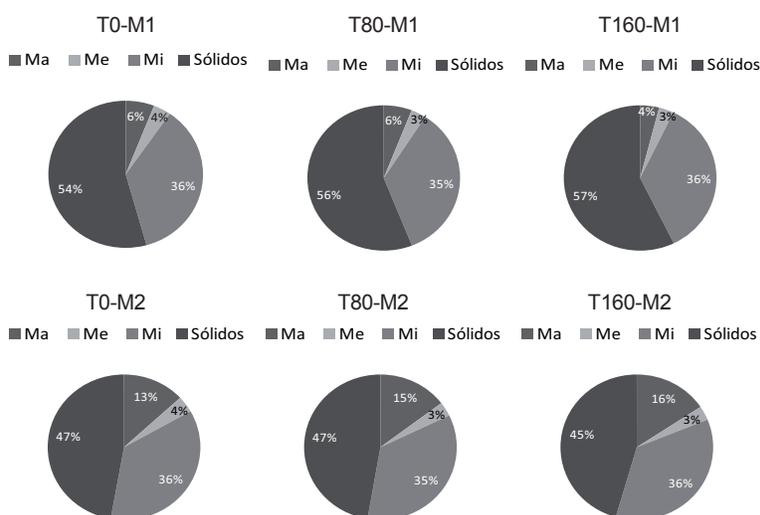


Figura 2. Distribución del tamaño de poros (%) en función de las dosis de efluente líquido de tambo aplicado previo al primer pastoreo de raigrás (*M1*) y antes del corte del sorgo (*M2*). *T0*: 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. *Ma*: macroporos, *Me*: mesoporos, *Mi*: microporos.

Figure 2. Pore size distribution (%) as a function of the rates of dairy cattle slurry applied before the first grazing of ryegrass (*M1*) and before cutting the sorghum (*M2*). *T0*: 0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T80*: 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; *T160*: 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. *Ma*: mesopores, *Mi*: micropores.

Los valores de meso y microporos permanecieron similares en ambos momentos de muestreo sin mostrar diferencias entre tratamientos. Aggelides & Londra (1999) observaron incrementos en la proporción de macroporos en los tratamientos que recibieron enmiendas orgánicas, sin que ocurrieran alteraciones en las otras fracciones de poros. Diversos trabajos demostraron que la fracción de poros que más se reduce por efecto de la compactación es la macroporosidad (Ghiberto *et al.*, 2007; Imhoff *et al.*, 2010; Dorota *et al.*, 2012).

En *M1* la proporción de macroporos, en todos los tratamientos, estuvo por debajo del umbral de porosidad de aeración considerado adecuado (10%) para el crecimiento de las raíces, para el movimiento del agua y aire en el suelo (Kay & Angers, 2000). Esta baja macroporosidad puede atribuirse al efecto del pisoteo animal acumulado durante los tres años de pastoreo de la alfalfa. Twerdoff *et al.* (1999) demostraron que el pastoreo con carga animal elevada genera una reducción de la porosidad del suelo y un aumento de la  $D_s$  con el transcurso del tiempo, y que los mayores valores se logran alrededor del primer año, permaneciendo estables a partir de ese momento.

Los resultados indican que ni el agregado de *ELT* ni la actividad radicular del raigrás fueron suficientes para mejorar el inadecuado estado estructural del suelo, especialmente los valores de macroporosidad y densidad del suelo. Sin embargo hay que destacar que el desarrollo del cultivo fue limitado por la escasez de lluvia, dado que las precipitaciones acumuladas desde abril a octubre fueron un 34% menor al promedio histórico (340 mm vs 514 mm). Esta condición y las bajas temperaturas de la estación invernal podrían haber ocasionado una reducida actividad de las raíces y microorganismos del suelo, la que se considera esencial para la recuperación de la estructura.

Por el contrario, en *M2* se verificó un incremento importante de la porosidad total del suelo y, especialmente, de la macroporosidad, con valores que superaron el umbral crítico en todos los tratamientos. En *M2* el *ELT* contenía una cantidad de materia orgánica muy superior a la determinada en *M1* (Tabla 2). Este hecho asociado al incremento de las temperaturas y lluvias que ocurren en la época primaveral probablemente indujeron un notable incremento en la actividad biológica del suelo especialmente en *T160*, que junto al mayor sistema radicular y duración del ciclo del cultivo de sorgo favorecieron la recuperación de la porosidad observada en *M1*. Las variaciones temporales de la porosidad del suelo y las propiedades

asociadas a éstas, como la infiltración del agua, también fueron registradas por Dorota *et al.* (2012), quienes evaluaron dichas propiedades en lotes que estuvieron bajo pastoreo intensivo y luego se cultivaron.

### Intervalo hídrico óptimo

Las diferencias en los valores de  $D_s$  entre tratamientos en *M1* se tradujeron en modificaciones en el *IHO* (Fig. 3).

La mayor amplitud del *IHO* se verificó en *T0* concordando con la mayor amplitud de variación de  $D_s$  (Tabla 8). El efecto de la compactación del suelo se tradujo en la reducción de la amplitud del *IHO*, que fue mayor en *T160* coincidiendo con los valores más elevados de  $D_s$ . Sin embargo, los tres tratamientos presentaron valores de  $D_{sc}$  (densidad de suelo crítica, aquella en la que el  $IHO=0$ ) semejantes, cercanos a  $D_{sc} = 1,51 \text{ g cm}^{-3}$ , coincidiendo con el valor sugerido como crítico para el crecimiento de las raíces para suelos franco-limosos (Daddow & Warrington, 1983). En los tres tratamientos el límite superior del *IHO* fue  $q_{cc}$  ( $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) hasta que  $D_s = 1,48 \text{ g cm}^{-3}$ . A partir de este valor,  $q_{pa}$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) se tornó la variable limitante. La variable  $q_{rp}$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) actuó como límite inferior en todo el intervalo de  $D_s$  medidas, siendo  $q_{pmp} = 0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

En *M1* una diferencia notable entre los tratamientos es el porcentaje de valores de  $D_s$  que superaron la  $D_{sc}$ . En *T0* los valores medidos de  $D_s$  fueron menores a la  $D_{sc}$ , mien-

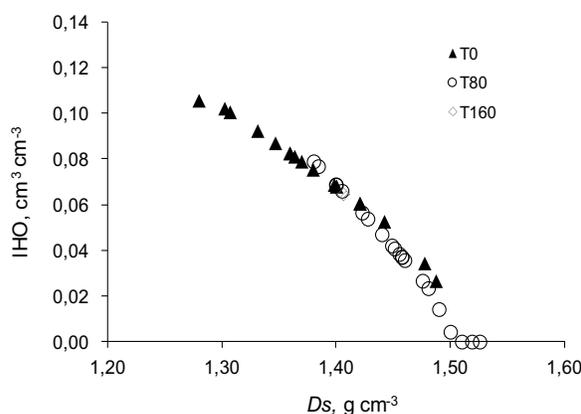


Figura 3. Intervalo hídrico óptimo (*IHO*) en función de la densidad del suelo ( $D_s$ ) y dosis de efluente líquido de tambo aplicado (*T0*:  $0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ; *T80*:  $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ; *T160*:  $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) previo al primer pastoreo de raigrás (*M1*).

Figure 3. Least limiting water range (*LLWR*) as a function of soil bulk density ( $Bd$ ) and dairy cattle slurry rates (*T0*:  $0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ; *T80*:  $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ; *T160*:  $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) previous to the first ryegrass grazing (*M1*).

tras que en *T80* y *T160* hubo un 10 y 29% de casos que la superaron, respectivamente. Esta situación define dos situaciones importantes: en *T80* y *T160* la probabilidad de que la humedad del suelo supere el límite crítico superior del *IHO* o disminuya por debajo de su límite crítico inferior durante el ciclo de un cultivo aumenta notablemente, dado que la amplitud máxima del *IHO* es 27 y 45% menor que en *T0*, respectivamente. Cuanto mayor la *Ds* (menor *IHO*), mayor será la posibilidad de experimentar estrés, especialmente si los valores de *Ds* se encuentran uniformemente distribuidos en el lote.

La otra condición es que en *T0*, mientras la humedad del suelo se mantuvo dentro del *IHO* las plantas pudieron crecer sin limitaciones de aire y/o resistencia mecánica debido a que la densidad de suelo medida no superó la *Dsc*. Asumiendo que la humedad del suelo mantuvo un valor similar en todas las parcelas, en *T80* y *T160* las plantas soportaron condiciones de estrés en todas las áreas en que la densidad del suelo superó la *Dsc*, lo que pudo haber contribuido a limitar el crecimiento potencial del raigrás. A pesar de esto, Gambaudo *et al.* (2014) encontraron diferencias en la producción de materia seca entre los tres tratamientos (*T0* = 4143 kg ha<sup>-1</sup>; *T80* = 4695 kg ha<sup>-1</sup>; *T160* = 5258 kg ha<sup>-1</sup>). Por lo tanto, es probable que esas diferencias hubieran sido más notables (mayor efecto positivo del *ELT*) si las condiciones de compactación hubieran sido menores.

En *M2* el rango de variación de *Ds* para *T0*, *T80* y *T160* fue 1,16-1,28 g cm<sup>-3</sup>, 1,15-1,28 g cm<sup>-3</sup> y 1,12-1,25 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Por lo tanto, en ningún tratamiento los valores de *Ds* superaron la *Dsc*, indicando una mejora notable de las condiciones físicas del suelo en *T80* y *T160*. Además, el menor rango de variación y los menores valores de *Ds* se verificaron en *T160*, aumentando las probabilidades de que el cultivo de sorgo se haya desarrollado más tiempo dentro del *IHO*. Este hecho asociado a la mayor disponibilidad de nutrientes, medida por el *ELT*, justifican la mayor producción de materia seca obtenida en este tratamiento por Gambaudo *et al.* (2014) (*T0* = 16.292 kg ha<sup>-1</sup>, *T80* = 21.128 kg ha<sup>-1</sup>; *T160* = 23.248 kg ha<sup>-1</sup>).

Los resultados indican que la aplicación de *ELT* en *M1* indujo un leve deterioro de la estructura del suelo que se evidenció por la mayor *Ds* promedio y un *IHO* más estrecho respecto del testigo. Esto puede haber sido consecuencia de la compactación ocasionada por el equipo estercolero y la escasa influencia benéfica del sistema *ELT*-cultivo-condiciones meteorológicas por lo motivos ya mencio-

nados. En *M2* se pudo corroborar el efecto positivo de la asociación *ELT*-sorgo-condiciones meteorológicas sobre las condiciones físicas del suelo. Este hallazgo destaca dos aspectos: por un lado no hubo degradación irreversible del suelo. Por otro, quedó en evidencia la influencia positiva que tiene la adición de abonos orgánicos sumada a la actividad de las raíces en la estructuración del suelo.

## CONCLUSIONES

La aplicación de *ELT* afectó las propiedades físicas del suelo, aunque las modificaciones también fueron dependientes de la interacción cultivo-condiciones meteorológicas. En general, el suelo con aplicación de *ELT* tuvo mayor capacidad de infiltración y de conducción de agua por bio y macroporos respecto al testigo. K resultó un indicador más eficiente que la distribución de agregados por tamaño y el *DMG* para detectar los cambios producidos en las propiedades físicas del suelo debido a la aplicación de *ELT*. En los tres tratamientos se determinó similar *Dsc*, pero con diferente amplitud del rango de *Ds* y porcentaje de casos registrados fuera del *IHO*. Los resultados de este trabajo señalan la necesidad de continuar los estudios en esta temática debido a que los *ELT* tienen una composición muy variable y no se dispone aún de suficiente información de sus efectos a largo plazo sobre la estructura del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

A CONICET y a la Universidad Nacional del Litoral por financiar este trabajo a través de los programas de Investigación y Desarrollo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aggelides, SM & PA Londra. 1999. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource Technology* 71: 253-259.
- Ankeny, MD; M Ahmed; TC Kaspar & R Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 467-470.
- AOAC. 1990. Official methods of analysis. 15<sup>th</sup> Ed. Association of Official Agricultural Chemistry. Washington, DC. USA 500 pp.
- Bianchi, A & S Cravero. 2012. Atlas climático digital de la República Argentina. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Salta Jujuy, Argentina, 56 pp.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (ed) *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, cap.13, p. 363-375.

- Braunack, MV & AR Dexter. 1989a. Soil aggregation in the seedbed: a review. I. properties of aggregates and beds of aggregates. *Soil & Tillage Research* 14: 259-279.
- Braunack, MV & AR Dexter. 1989b. Soil aggregation in the seedbed: a review II. Effect of aggregate sizes on plant growth. *Soil & Tillage Research* 14: 281-298.
- Buscher, WJ. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the ASAE* 33: 519-524.
- Celik, I; I Ortas & S Kilic. 2004. Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil & Tillage Research* 78(1): 59-67.
- Daddow, RL & GE Warrington. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. WSDG Rep. WSDG-TN-00005. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Watershed Systems Development Group. 17 p.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2013. InfoStat, versión 2013, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Díaz Zorita, M; E Perfect & JH Grove. 2002. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil & Tillage Research* 64: 3-22.
- Dorota, D; J Dorner; O Balocchi & I Lopez. 2012. Temporal dynamics of hydraulic and mechanical properties of an Andosol under grazing. *Soil & Tillage Research* 125: 44-51.
- Feng, GL; J Letey; AC Chang & M Campbell. 2005. Simulating dairy liquid waste management options as a nitrogen source for crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 110(3-4): 219-229.
- Gambaudo, S; S Imhoff; ME Carrizo; M Marzetti & S Racca. 2014. Uso de efluentes líquidos de tambo para mejorar la fertilidad del suelo y productividad de los cultivos. *Ciencia del Suelo*, en prensa.
- Ghiberto, PJ; MA Pilatti; S Imhoff & J Orellana. 2007. Hydraulic conductivity of Molisols irrigated with sodic-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentina). *Agricultural Water Management* 88: 192-200.
- Imhoff, S; PJ Ghiberto; A Grioni & JP Gay. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine flat pampa. *Geoderma* 158: 268-274.
- Imhoff, S; A Pires da Silva; PJ Ghiberto; CA Tormena; MA Pilatti & PL Libardi. 2012. Soil compressibility of Argiudolls and Hapludolls of Santa Fe-Argentina. In: ISTRO Congress, Montevideo, Uruguay. 2012. CD Room ISTRO.
- Kay, BD & DA Angers. 2000. Soil Structure. In: Sumner, ME (ed) *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 229-224.
- Khan, AUH; M Iqbal & KR Islam. 2007. Dairy manure and tillage effects on soil fertility and corn yields. *Bioresource Technology* 98: 1972-1979.
- Klute, A & C Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. *Amer. Soc. Agron.* 47 pp.
- Leão, TP; A Pires da Silva; E Perfect & CA Tormena. 2005. A simplified Excel algorithm for estimating the least limiting water range for soil. *Agronomy Journal* 97: 1210-1215.
- Mosconi, FP; LJ Priano; NE Hein; G Moscatelli; JC Salazar; T Gutiérrez & L Cáceres. 1981. Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe. INTA-MAG Santa Fe. Santa Fe.
- Perroux, KM & I White. 1988. Design for disk permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1205-1215.
- Pilatti, MA; S Imhoff; PJ Ghiberto & RP Marano. 2006. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Pires da Silva, A; B Kay & E Perfect. 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775-1781.
- Twerdoff, DA; DS Chanasyk; E Mapfumo; NA Naeth & VS Baron. 1999. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. *Canad. J. Soil Sci.* 79: 465-471.
- White, W. 1993. Dry aggregate distribution. In: Carter, MR (ed). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canada: Lewis Publis. p. 659-662.
- Woodard, KR; EC French; LA Sweat; DA Graetz; LE Sollenberger; B Macoon; KM Portier; BL Wade; SJ Rymph; GM Prine & HH Van Horn. 2002. N removal and nitrate leaching for forage systems receiving dairy effluent. *J. Environ. Qual.* 31: 1980-1992.
- Wu, L; G Feng; J Letey; L Ferguson; J Mitchell; B McCullough-Sanden & G Markegard. 2003. Soil management effects on the nonlimiting water range. *Geoderma* 114: 401-414.