

Modificación de algunas propiedades físicas en un suelo del Valle del Guadalquivir enmendado con lodos de depuradora.

F. Muñoz Gant, M.J. Polo Gómez¹ y J.V. Giráldez Cervera

Dpto. Agronomía, E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba, Apdo. 3048, 14080 Córdoba. ¹*e-mail*: ag1pogom@uco.es

RESUMEN. La necesidad de eliminar los residuos producidos en la depuración de aguas residuales y la posibilidad de reutilizar un material rico en elementos nutrientes por su naturaleza orgánica, hacen de la aplicación de lodos de depuradora en suelos agrícolas una alternativa viable. En este trabajo se ha determinado, tras varias aplicaciones y ciclos de cultivo, el efecto que la incorporación de esta fuente de materia orgánica ha tenido sobre algunas propiedades físicas en un suelo aluvial de la zona de Córdoba, estudiando el proceso de infiltración bajo diferentes succiones en superficie, y caracterizando la curva de retención y la de conductividad hidráulica, en concreto, las condiciones de saturación con el método de Philip-Dunne. Para ello se han comparado los resultados obtenidos en un caso testigo, sin tratar, con los correspondientes a la aplicación de dos dosis distintas de lodos, estableciendo la estabilidad de los incrementos de materia orgánica en el suelo receptor.

ABSTRACT. Sewage sludge application to agricultural soils constitutes not only a disposal alternative but also a reuse of certain resources present in this residue, mainly a high content of organic matter. This work aims to determine the effect of such application on some physical properties of an alluvial soil in the area of Cordoba, after several years of disposal. The infiltration process in the soil surface under different succions was studied under field conditions, and the characteristic curve was also obtained. Saturation conditions were evaluated by the Philip-Dunne method. Sludge effects were studied by comparing the results obtained in field plots which had received two different annual doses with those obtained in control plots, pursuing to establish the estabilyty of the organic matter increase in the surface horizon, as a result of the sludge addition.

transmisión de agua, gases y calor se refiere. Asimismo, proporciona una reserva estable de nutrientes para la planta y organismos en general residentes en el medio, alterando al mineralizarse ciertas propiedades químicas del mismo. Los suelos agrícolas sufren un desequilibrio en el mantenimiento de niveles estables de materia orgánica debido a numerosas razones (laboreo, producciones intensivas, uso de fitosanitarios...) a las cuales el hombre no ha sido en absoluto ajeno, con la consiguiente disminución de la fertilidad natural del horizonte superficial, más acentuada bajo las condiciones semiáridas de nuestra zona. Los lodos de depuradora, al igual que otros residuos urbanos y agrícolas, constituyen una fuente de materia orgánica alternativa a los distintos estiércoles de origen animal utilizados tradicionalmente, y cada vez más escasos. Estos residuos han sido incinerados, depositados en vertederos o vertidos al mar (prohibido en E.E.U.U. en 1993 y en la U.E. en 1998), con las esperables consecuencias sobre el medio, despilfarrando de esta forma un recurso apreciado. Así, su aplicación controlada al suelo en aquellos casos en que las concentraciones de los distintos metales pesados y otros compuestos tóxicos presentes en los lodos se mantengan por debajo de los niveles permitidos o recomendables, permite, por una parte, contribuir al mantenimiento sostenible de los sistemas agrícolas o recuperar zonas degradadas y, por otra, eliminar un residuo cada vez más abundante en nuestro país a medida que se aplica la directiva 91/271/CEE (Consejo C.E., 1991), que obliga a depurar las aguas residuales domésticas antes del 2005.

Numerosos trabajos demuestran el gran potencial presentado por los lodos de depuradora a la hora de aumentar la productividad de un suelo, debido al contenido de nutrientes de los mismos (alrededor de un 3-6% N, 1-5% P), quedando de manifiesto el valor fertilizante de estos residuos (Loehr *et al.*, 1979). Sin embargo, sólo una pequeña fracción de estos estudios está dedicada al estudio de la modificación que experimentan las propiedades físicas de un suelo cuando se incorporan lodos al mismo, aun cuando existe evidencia de que los incrementos de producción obtenidos no son exclusivamente el resultado de un mayor aporte nutritivo al cultivo, sino que las condiciones físicas del suelo se ven mejoradas, e incluso en estos trabajos las conclusiones obtenidas son difícilmente extrapolables. Los resultados difieren en función del tipo de lodo aplicado (crudo o digerido, desecado, compostado),

1.- Introducción.

La materia orgánica de un suelo es sin duda el componente que contribuye de forma más global a mantener su capacidad productiva. Influye en características físicas como la porosidad, estado de agregación de las partículas, densidad aparente, etc., y afecta al comportamiento del suelo en lo que a retención y

características del suelo receptor (textura, contenido de materia orgánica, pH, contenido de carbonatos), manejo del suelo y de la cubierta vegetal, condiciones climáticas, duración del período de aplicación de los lodos y momento en que se realicen los muestreos o ensayos. Asimismo, son escasos los trabajos que cuantifican los efectos de este aporte de materia orgánica a largo plazo y/o la permanencia de los mismos una vez que la aplicación de lodos ha cesado, punto de especial interés en la zona mediterránea, sujeta a mayores tasas de mineralización de la materia orgánica en el suelo por las condiciones climáticas.

El objetivo de este trabajo es evaluar los cambios en la capacidad de retención y transmisión de agua en un suelo en el Valle del Guadalquivir tras varios ciclos de aplicación de lodos, relacionándolos con la dosis aportada.

2.- Metodología.

2.1.- Características del suelo.

Las muestras de suelo utilizadas en los ensayos se obtuvieron de un bloque de parcelas ubicadas en la finca experimental "Alameda del Obispo" del Centro de Investigación y Formación Agraria de Córdoba, en una terraza del río Guadalquivir a su paso por esta ciudad. El suelo se clasifica como *Xerofluvent típico* en el sistema de taxonomía americano, y fue caracterizado antes de efectuar aplicación alguna de lodos (Tabla 1), destacando su gran homogeneidad, con un horizonte superficial con un contenido de materia orgánica cercano al 1% y una textura franca. En estas parcelas se llevó a cabo un estudio del potencial agronómico de los lodos de depuradora producidos en la estación de aguas residuales de Córdoba, adoptándose tres tratamientos: testigo, A y B, equivalentes a 0, 40 y 80 Mg/ha de masa húmeda de lodos (65% de humedad). Las dimensiones de las parcelas fueron 6x10 m² y se efectuaron cuatro repeticiones para cada dosis distribuidas al azar dentro del bloque.

Tabla 1. Características del suelo de las parcelas de experimentación (Julio 1994).

Profundidad (cm):	0-30	30-60	60-90
pH	8.1	8.2	8.1
Textura	franca	franca	franca
Arena (%)	44.6	45.5	46.5
Limo (%)	41.1	42.9	42.0
Arcilla (%)	14.2	11.6	11.5
M.O. (%)	1.10	0.86	0.55
N org. (%)	0.061	0.050	0.036
C/N	10.5	10.0	8.9
CO ₃ ⁼ (%)	19.8	18.2	17.5
C.I.C. (mmol/kg)	105.1	94.7	79.5

Desde el año 1994 y hasta la fecha de realización de estos ensayos, se realizaron tres aplicaciones de lodos en estas parcelas, en concreto, en Julio de 1994, Agosto de 1995 y

Marzo de 1998, con las dosis antes citadas. Los residuos proceden de un tratamiento de depuración de aguas residuales por fangos activados y en la estación depuradora sufren un proceso de desecado mecánico mediante una centrífuga. Estos lodos fueron caracterizados durante 1993 (Polo *et al.*, 1998), comprobándose que cumplían los requisitos establecidos para su uso en agricultura (M.A.P.A., 1990). La Tabla 2 recoge el contenido de materia orgánica y otras características significativas de las partidas aplicadas en cada ocasión.

Tabla 2. Algunas características de los lodos aplicados cada año.

	Julio 94	Agosto 95	Marzo 98
Humedad (%)	63	66	64
pH	6.8	6.7	6.3
M.O. (%)	55.6	65.5	34.1
N org. (%)	3.1	3.9	2.0
C/N	10.6	9.9	10.0

En cada ocasión se siguió el mismo manejo de las parcelas: los lodos fueron esparcidos sobre la superficie de las parcelas, quedando expuestos a la intemperie durante aproximadamente un mes. Posteriormente fueron incorporados superficialmente mediante un pase de grada de discos. Los cultivos desarrollados fueron girasol (94/95), trigo (95/96), girasol (96/97), dejándose las parcelas en barbecho el último ciclo (97/98). No se realizó ningún abonado adicional para no enmascarar los resultados debidos a los lodos.

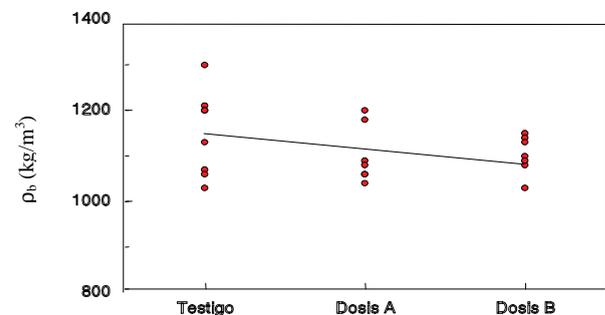


Fig. 1. Variación de la densidad aparente del horizonte superficial de lodos con la dosis aplicada de lodos (la línea es la regresión lineal de los datos, $r^2 = 0.08$).

Finalizado este período, se plantearon los ensayos descritos en los puntos 2 y 3 de este apartado, realizados a principios de otoño de 1998. En primer lugar, se determinó el contenido de materia orgánica (Walkley-Black) del horizonte superficial del suelo tomando muestras dobles de los primeros quince centímetros en todas las parcelas, así como los valores de densidad aparente correspondientes, por su relación con el comportamiento del suelo en lo que a retención y movimiento del agua se refiere. Las muestras fueron tomadas al azar dentro de cada parcela. Los resultados aparecen en la Tabla 3. Se observan diferencias apreciables, aunque no significativas ($\alpha=0.05$) en el caso de

la densidad aparente, en los valores de ambos parámetros en los suelos tratados frente al testigo. La densidad aparente no varió para las dos dosis de lodos estudiadas, contrastando con trabajos que relacionan linealmente la disminución de la densidad aparente con la cantidad materia orgánica aportada (Clapp *et al.*, 1986), aunque la diferencia con el testigo es parecida a la citada en la revisión que hacen estos autores sobre el tema.

Para la determinación de la densidad aparente se tomaron dos muestras inalteradas de volumen conocido en cada parcela que fueron pesadas en laboratorio tras ser secadas en estufa a 105°C. En la Figura 1 se puede observar la dispersión de los datos individuales de las parcelas correspondientes a cada tratamiento, inversamente proporcional a la dosis de lodos aplicada. Esta tendencia ya se había observado en determinaciones previas de diferentes parámetros, lo cual parece indicar que este suelo, la adición de lodos ha supuesto una homogeneización espacial al menos en superficie, hecho que repercute en unas mejores condiciones para el cultivo.

Tabla 3. Densidad aparente y contenido de materia orgánica del horizonte superficial del suelo en la fecha de realización de los ensayos (Octubre 1998).

Dosis de lodos:	T	A	B
M.O. (%)	1.18 a*	1.34 b	1.44 c
σ_{MO} (%)	0.06	0.03	0.02
ρ_b (kg/m ³)	1160 a	1113 a	1112 a
σ_{pb} (kg/m ³)	95	62	40

T, testigo; A, 40 Mg/ha; B, 80Mg/ha

*Valores diferentes a un nivel de 0.05

2.2.- Curvas de retención de agua.

La curva de retención de agua viene dada por la variación del contenido volumétrico de agua del suelo con el potencial matricial. Para determinarla se siguió el método propuesto por Haines (Klute, 1986), consistente en someter las muestras de suelo a cierta tensión hasta que se alcanza el punto de equilibrio, tras lo cual se determina la humedad volumétrica final. Repitiendo el proceso a distintas tensiones se obtienen los distintos puntos de la curva para cada muestra.

En todas las parcelas se tomó al azar una muestra inalterada en superficie mediante unos anillos de 5 cm de diámetro y un volumen de 39.3 cm³, y se llevó a condiciones de saturación en sentido ascendente para provocar la salida de aire de sus poros. Tras desaguar durante dos horas, cada muestra fue colocada en una copa de succión revestida en su fondo con un papel de filtro y una capa de escayola de 0.5 cm de espesor, comprobando que la muestra estaba totalmente en contacto con esta. El conjunto se cubrió con plástico para evitar pérdidas de agua por evaporación. Las diferentes tensiones, aplicadas durante veinticuatro horas, fueron 15, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 cm de columna de agua.

2.3.- Ensayos de infiltración.

Para determinar la conductividad hidráulica saturada en las parcelas en estudio se realizó un ensayo en campo usando el infiltrómetro de carga variable de Philip-Dunne (Philip, 1993), que consiste en un tubo cilíndrico que se inserta en el suelo y se llena de agua hasta un cierto calado, tras lo cual se inicia el proceso de infiltración. Con la lectura del tiempo en el que el agua alcanza un calado mitad del inicial, y el tiempo total en el que se agota el agua, se puede establecer el valor de la conductividad hidráulica saturada del suelo. En este caso se realizaron cuatro ensayos por parcela (en total dieciséis por tratamiento) con un infiltrómetro de 20 cm de calado máximo y un radio interno de 4.4 cm, que se introdujo en cada ensayo hasta 10 cm de profundidad, rellenando la posible holgura lateral con arena. En todos los casos se determinó la humedad del suelo inicial y final. Los ensayos se localizaron al azar dentro de cada parcela.

La conductividad hidráulica bajo diferentes succiones fue estudiada utilizando el infiltrómetro de succión desarrollado por Perroux *et al.* (1982), para poder evaluar la influencia de los poros correspondientes a un determinado tamaño. Se realizó al menos un ensayo por parcela aplicando 10, 20 y 50 mm de tensión. Para conseguir el contacto completo de la base del infiltrómetro con la superficie del suelo se dispuso sobre esta una capa de 5 mm de espesor de arena tamizada a 1 mm, evitando así los efectos de las irregularidades del terreno. En los ensayos se registró el volumen de agua infiltrado cada cinco minutos. De nuevo, la humedad del suelo inicial y final fue determinada.

3.- Curvas de retención de agua.

Una vez obtenidos los valores de humedad volumétrica correspondientes a cada potencial matricial para cada muestra, se ajustó la ecuación de la curva de retención de agua para cada tratamiento utilizando el modelo propuesto por van Genuchten (1980), según la expresión:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (-\alpha \phi_m)^n]^m \quad (1)$$

donde θ es la humedad volumétrica del suelo a un potencial matricial ϕ_m (cm); θ_r y θ_s la humedad volumétrica residual y en saturación, respectivamente; α (cm⁻¹), m y n , parámetros del modelo, con la relación $m = 1 - 1/n$ adoptada para la mayoría de los suelos. El ajuste se realizó mediante el algoritmo de Rosenbrock (*e.g.* Clarke, 1973). Las curvas se representan en la Figura 2, y los parámetros del modelo se recogen en la Tabla 4.

Si se comparan las curvas correspondientes a cada tratamiento con la curva obtenida para el testigo, se observa que el contenido de agua del suelo se ha visto incrementado en general para la dosis A (40 Mg/ha), mientras que la dosis B (80 Mg/ha) sólo supera los valores del testigo en condiciones de saturación. Se podrían establecer dos situaciones: para valores de succión inferiores a 30 cm, el suelo tratado con la dosis A se comporta como el testigo

salvo en condiciones próximas a saturación, bajo las cuales la humedad volumétrica es mayor en el primer caso; el suelo tratado con la dosis B se mantiene en este intervalo con valores de humedad superiores al testigo en todo caso, si bien la humedad de saturación es intermedia entre las correspondientes al testigo y a la dosis A. Por otra parte, para valores de succión superiores a 30 cm el suelo tratado con la dosis B se comporta igual que el testigo, presentando por el contrario el suelo tratado con la dosis A valores de humedad claramente superiores.

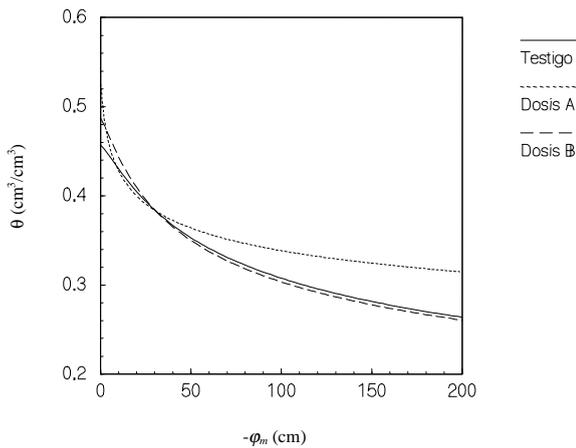


Fig. 2. Curvas de retención de humedad para cada tratamiento ajustadas al modelo de van Genuchten (1980); (testigo, línea continua; 40 Mg/ha, línea punteada; 80 Mg/ha, línea rayada).

Tabla 4. Parámetros de la ecuación de van Genuchten (1980) ajustada para cada tratamiento.

Dosis	θ_s	θ_r	α (cm ⁻¹)	n	m	r^2
T	0.457	0.02	0.0437	1.26	0.21	0.92
A	0.525	0.02	0.5987	1.11	0.10	0.75
B	0.487	0.02	0.0685	1.25	0.20	0.91

T, testigo; A, 40 Mg/ha; B, 80 Mg/ha

El contenido de agua en saturación se ha incrementado en los dos suelos tratados con lodos con respecto al testigo, siendo mayor para la dosis A. En este tratamiento, además, se observa un aumento de microporos con respecto a la dosis mayor, B, a partir de los valores de α resultantes, aun. Este parámetro está relacionado con el inverso de la dimensión media de los microporos del suelo, y es el responsable de la horizontalidad de la curva para los valores más elevados de succión. Los resultados pueden deberse a una mayor formación de agregados en el suelo B, incrementándose el tamaño de los poros, o a un mayor taponamiento de los microporos en este suelo por haber recibido aportes más altos de materia orgánica. En cualquier caso el valor de α resultante para el suelo A es excesivo, y sería necesario contrastarlo en nuevos ensayos. La ecuación para este suelo es asimismo la que presenta un peor ajuste a los datos obtenidos, por defecto a potenciales altos y por exceso para valores bajos. Los resultados encontrados por distintos autores dependen de las

características iniciales del suelo receptor (textura y contenido de carbono orgánico), aunque en general la adición de lodos incrementó la retención de agua por el suelo tanto para valores próximos a capacidad de campo, como en el punto de marchitez permanente. Así, suelos con textura más gruesa incrementaron su contenido de agua al recibir lodos en todo el intervalo de variación del potencial (Kladivko y Nelson, 1979, citados por Clapp *et al.*, 1986), mientras que en suelos arcillosos el incremento producido es mayor para potenciales mayores (Khaleel *et al.*, 1981), probablemente debido a la formación de agregados y, por ello, poros de mayor tamaño. Por el contrario en suelos con mayor proporción de arena la adición de materia orgánica induciría la aparición de microporos, aumentando la capacidad de retener agua a potenciales más bajos.

En cualquier caso, cabe destacar que el suelo B es el que potencialmente presenta un mayor volumen de agua disponible para la planta, ya que se observa en él la mayor diferencia entre los valores de humedad máxima y mínima en la curva de retención.

4.- Movimiento del agua en el suelo.

4.1.- Conductividad hidráulica saturada.

El descenso del agua en el tubo del infiltrómetro de Philip-Dunne se relaciona con el tiempo en una expresión propuesta por Philip (1993), en la que intervienen como parámetros del suelo la conductividad hidráulica saturada, K_s , y la componente matricial del potencial del agua en el frente de humedecimiento. De esta forma, a partir de la lectura del tiempo en el que el agua desciende la mitad de la longitud del tubo y del tiempo en el que se ha infiltrado en su totalidad, se pueden calcular ambos parámetros (De Haro *et al.*, 1998). En la Tabla 5 aparecen los valores medios (μ) y la desviación típica (σ) correspondiente para K_s en cada tratamiento junto con el incremento de humedad volumétrica, $\Delta\theta$, tras la realización de los ensayos (n es el número de ensayos para cada tratamiento).

Tabla 5. Valores de K_s y $\Delta\theta$ usando el infiltrómetro de Philip-Dunne.

	T		Dosis A		Dosis B	
	K_s (mm/h)	$\Delta\theta$	K_s (mm/h)	$\Delta\theta$	K_s (mm/h)	$\Delta\theta$
n	16		16		16	
μ	99.3	0.232	77.1	0.252	73.3	0.268
σ	105.5	0.035	89.21	0.033	97.3	0.029

T, testigo; A, 40 Mg/ha; B, 80 Mg/ha

Aun cuando las diferencias existentes no son estadísticamente significativas (nivel de significancia de 0.05) se observa cómo la conductividad hidráulica saturada disminuye a medida que aumenta la dosis de lodos aplicada, con mayores diferencias entre el testigo y la primera dosis que entre ambos tratamientos de lodos A y B, que presentan valores muy próximos (si bien los niveles de materia orgánica –Tabla 3- en estos dos últimos se

mantenían diferentes en el momento del ensayo). Estos resultados son razonables ya que el material de partida es un suelo franco con escaso contenido de materia orgánica y el aporte de lodos incrementa significativamente la presencia de esta en el mismo, afectando a la capacidad de retención de agua, como ha quedado de manifiesto en el apartado anterior.

La mayoría de los trabajos muestran cómo la conductividad hidráulica saturada aumenta tras el aporte a medida que se incrementa la dosis de lodos (Epstein, 1975; Jacobowitz y Steenhuis, 1984), pero los cambios observados disminuyen a medida que transcurre el tiempo tras la incorporación de los residuos, volviendo a los valores iniciales. En climas semiáridos, la intensidad de los procesos de mineralización hacen que los aportes orgánicos tengan efectos poco estables.

4.2.- Conductividad hidráulica a diferentes succiones.

Para el cálculo de la conductividad hidráulica a diferentes succiones se aplicó el modelo de Green y Ampt (1911), llegando a la expresión:

$$K(\Psi) \cdot t = I - \Delta\phi_m \Delta\theta \cdot L(1 + I / (\Delta\phi_m \Delta\theta)) \quad (2)$$

en la que $K(\Psi)$ es la conductividad hidráulica correspondiente al potencial Ψ , t el tiempo, I la infiltración acumulada, ϕ_m la componente matricial del potencial del agua en el suelo en el frente de humedecimiento, y θ la humedad volumétrica. En la Tabla 6 aparecen, para cada tratamiento, los resultados medios del ajuste de esta ecuación a los datos obtenidos en cada ensayo con el infiltrómetro de succión (n es el número de ensayos en cada caso).

Tabla 6. Valores medios de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt ajustados a los datos de los ensayos con el infiltrómetro de succión.

Dosis	Ψ (mm)	$K(\Psi)$ (mm/h)	$\Delta\phi_m \Delta\theta$ (mm)	n	r^2
T	10	70.6	0.677	6	0.9993
	20	65.3	0.376	4	0.9994
	50	35.1	2.484	6	0.9984
A	10	41.6	0.422	4	0.9992
	20	59.3	0.349	4	0.9992
	50	29.1	1.078	5	0.9990
B	10	59.2	0.525	6	0.9995
	20	63.0	0.432	4	0.9990
	50	32.3	3.297	5	0.9976

T, testigo; A, 40 Mg/ha; B, 80 Mg/ha

Es necesario señalar que la ecuación se ajustó bien a cada ensayo considerado de forma individual, pero sin embargo existían numerosas diferencias entre las repeticiones correspondientes a cada tratamiento y succión aplicada. Para contrastar si la causa se hallaba en la variabilidad espacial ya observada en estas parcelas desde inicios de la

aplicación de lodos, o si, por el contrario, era debida a los ensayos de infiltración en sí, se utilizaron los valores de conductividad hidráulica obtenidos en cada tratamiento para ajustar los parámetros a y K_s de la ecuación de Gardner (1958):

$$K(\Psi) = K_s \cdot \exp(a \cdot \Psi) \quad (3)$$

K_s fue asimismo estimada para cada tratamiento a partir de los valores de $K(\Psi)$ (Tabla 6) utilizando la expresión propuesta por van Genuchten (1980) a partir del modelo de Mualem (1976):

$$K(\Psi) / K_s = A^{m/2} (1 - (1 - A)^m)^2 \quad (4)$$

siendo $A = (1 - (-\alpha \Psi)^n)^{-1}$, y α , n , m , los parámetros de la ecuación 1 propuesta por este mismo autor (ver Tabla 4). Los valores medios obtenidos aparecen en la Tabla 7 y de ellos se puede comprobar, en primer lugar, cómo en el caso del suelo A los parámetros correspondientes requieren un mejor ajuste ya que arrojan resultados fuera de lugar, y en segundo lugar, que la conductividad hidráulica saturada estimada por esta expresión no responde a los valores resultantes de los ensayos de campo (Tabla 5). Podría argüirse que la medida en estos últimos se realizó a diez centímetros de profundidad y no en superficie como en el caso de los ensayos de succión; sin embargo, esto no ha supuesto una diferencia tan importante en el caso de la ecuación de Gardner, por lo que cabe deducir que el modelo de conductividad insaturada de van Genuchten no se ha ajustado bien a estos resultados, ya sea por una insuficiencia de datos ya por el comportamiento de la ecuación en sí.

Tabla 7. K_s estimada a partir de la ecuación 4 (van Genuchten, 1980).

Dosis	K_s (mm/h)	σ (mm/h)
T	265.1	38.1
A	24296.3	22286.8
B	364.77	107.6

T, testigo; A, 40 Mg/ha; B, 80 Mg/ha

De los resultados del ajuste de la ecuación de Gardner (ver Tabla 8) se comprueba la gran dispersión de los datos recogidos en los ensayos; sin embargo, conviene destacar cómo los valores de la conductividad hidráulica saturada obtenidos muestran la misma tendencia con la dosis de lodos que los correspondientes a los ensayos con el infiltrómetro de Philip-Dunne en estas mismas parcelas, e incluso que dichos valores son del mismo orden de magnitud (99.3, 77.1 y 73.3 mm/h para el testigo, A y B respectivamente –ver el punto 1 de este apartado). Por ello, no parece aventurado afirmar que la variabilidad en los datos puede ser fruto de las características espaciales de las parcelas (hecho que por otra parte ha sido observado por los autores en otros trabajos efectuados en las mismas), y de la realización de ensayos en condiciones de campo.

Tabla 8. Parámetros de la ecuación de Gardner ajustada a los resultados de los ensayos con el infiltrómetro de succión.

Dosis	K_s (mm/h)	a (mm^{-1})	r^2
T	85.7	0.0274	0.2589
A	73.1	0.0207	0.0433
B	72.8	0.0166	0.2634

T, testigo; A, 40 Mg/ha; B, 80 Mg/ha

El parámetro a está relacionado con características físicas del suelo, en concreto, con su textura y estructura, y se observa cómo su valor disminuye a medida que aumenta la dosis de lodos.

En la Figura 3 se han representado las curvas ajustadas correspondientes a cada tratamiento ampliando el intervalo de valores para la succión aplicada. A pesar de que las ecuaciones no fueron obtenidas a partir de datos cubriendo todo el intervalo de representación, sí pueden arrojar alguna idea del comportamiento de estos suelos tratados con lodos.

idea del comportamiento de estos suelos tratados con lodos.

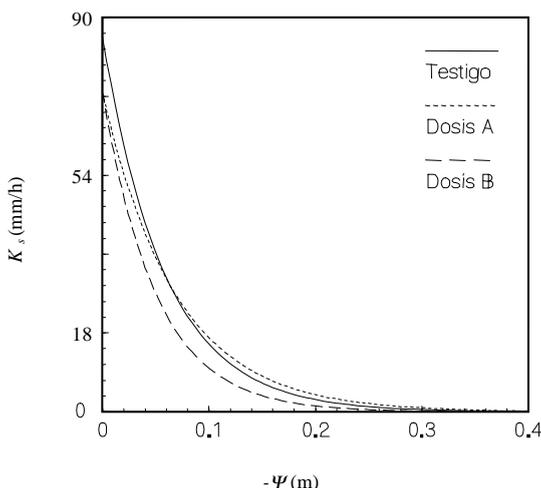


Fig. 3. Ecuación de Gardner ajustada a los ensayos con el infiltrómetro de succión (testigo, línea continua; A, línea rayada; B, línea punteada).

Para potenciales altos los suelos con lodos presentan valores de conductividad hidráulica similares entre sí e inferiores al testigo; sin embargo, a medida que disminuye el potencial el suelo B se diferencia del A, quedando en valores algo superiores a los del testigo. La menor conductividad hidráulica en condiciones cercanas a saturación permitiría disponer del agua almacenada durante un mayor período de tiempo; el suelo tratado con la dosis B, además, en situaciones de humedad reducida es capaz de infiltrar el agua con mayor rapidez, hecho que puede ser interesante en suelos con tendencia al encharcamiento que se encuentren en zonas que reciban precipitaciones torrenciales producidas por tormentas estivales.

5.- Conclusiones.

En general, la disminución de la densidad aparente en los suelos tratados con lodos junto con la naturaleza orgánica del aporte que estos residuos representan han originado ciertos cambios medibles en el comportamiento del suelo, tanto en la retención de agua como en el movimiento de la misma a través del perfil, aunque las diferencias encontradas no han sido significativas estadísticamente, no obstante. Esto evidencia cómo las variaciones estables de aquellos parámetros que explican las características físicas de un suelo no se producen fácilmente en condiciones semiáridas, a pesar de añadir cantidades altas de materia orgánica al mismo. La intensidad de los procesos de mineralización en estos climas, junto con la influencia de los métodos de cultivo, hacen que sean necesarios períodos largos de aportes al menos con una frecuencia anual para poder observar las mejoras inducidas por el incremento de componentes orgánicos en el suelo.

En cuanto a las dos dosis de lodos en estudio, evaluando de forma conjunta los resultados obtenidos en estos ensayos, parece que la dosis B (80 Mg/ha de lodos con un 65% de humedad) realiza un aporte de materia orgánica suficiente para mejorar la estructura del suelo, ya que es capaz de retener un mayor volumen de agua pero a la vez presenta mejores condiciones para el transporte de la misma, como prueba el hecho de que la conductividad hidráulica saturada sea parecida a la correspondiente a la dosis A (40 Mg/ha de lodos). Esta última, sin embargo, ofrece un volumen de agua disponible para la planta menor por retenerla en mayor proporción en todo el intervalo de potencial estudiado; así podría decirse que la dosis A supone un aporte orgánico sin incidencia en la estructura del suelo en el período de tiempo estudiado, mientras que la dosis B sí consigue mejorar el estado de agregación del suelo. Resultados parecidos fueron encontrados al evaluar el comportamiento químico de estos suelos (Polo *et al.*, 1997; 1999), obteniéndose variaciones significativas de la capacidad intercambio catiónico del suelo tratado con la dosis B con respecto al testigo, sin observarse cambio alguno para la dosis A, aunque los valores de materia orgánica en el horizonte superficial sí habían aumentado.

Conviene señalar que la variabilidad espacial inherente a todo ensayo de campo es aún más influyente a la hora de valorar los resultados de los mismos cuando se estudian parámetros físicos del suelo, como ha quedado de manifiesto en este trabajo. Por ello conseguir una buena uniformidad en la distribución de los lodos en superficie debe ser un objetivo a la hora de aplicarlos al suelo, con el fin de conseguir unos efectos más homogéneos en este.

Referencias.

- Clapp, C.E., S.A. Stark, D.E. Clay y W.E. Larson. 1986. Sewage sludge organic matter and soil properties. En: *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*, pp. 209-253. Y Chen, Y. Avnimelech (eds.). Martinus Nijhoff. Dordrecht.
- Clarke, R.T. 1973. *Mathematical Models in Hydrology*. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 19. Roma.
- Consejo de las Comunidades Europeas. 1991. Directiva del Consejo 91/271/CEE de 21 de Mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas

- residuales urbanas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* de 30 de Mayo de 1991.
- De Haro, J.M., K. Vanderlinden, J.A. Gómez y J.V. Giráldez. 1998. Medida de la conductividad hidráulica saturada del suelo con el infiltrómetro de Philip-Dunne: aplicabilidad y limitaciones. *Actas del Congreso Progresos en la Investigación en la Zona No Saturada*, pp. 9-20. Universidad de Huelva.
- Epstein, E. 1975. Effect of sewage sludge on some soil physical properties. *J. Environ. Qual.* 4: 139-142.
- Gardner, W.R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85: 228-232.
- Green, W.H. y G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics I. Flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24.
- Jacobowitz, L.A. y T.S. Steenhuis. 1984. Compost impact on soil moisture and temperature. *Biocycle* 25: 56-60.
- Khaleel, R., K.R. Reddy y M.R. Overcash. 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *J. Environ. Qual.* 10: 133-141.
- Kladivko, E.J. y D.W. Nelson. 1979. Changes in soil properties from application of anaerobic sludge. *J. Water Poll. Control Fed.* 51: 325-332.
- Klute, A. Ed. 1986. *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods.* Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin.
- Loehr, R.C., W.J. Jewell, J.D. Novak, W.W. Clarkson y G.S. Friedman. 1979. *Land Application of Wastes.* Van Nostrand Reinhold. Nueva York.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1990. Real Decreto 1310/1990 de 29 de Octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. *B.O.E. de 1 de Noviembre de 1990.*
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
- Perroux, K.M., P.A.C. Raats y D.E. Smiles. 1982. Wetting moisture characteristic curves derived from constant-rate infiltration into thin soil samples. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 231-234.
- Philip, J.R. 1993. Aproximate analysis of fallin-head lined borehole permeameter. *Water Resour. Res.* 29: 3763-3768.
- Polo, M.J., R. Ordóñez y J.V. Giráldez. 1997. *Uso Agrícola de Lodos de Depuradoras.* Comunicación I+D 23/97 Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Polo, M.J., R. Ordóñez y J.V. Giráldez. 1998. Caracterización de los lodos de la EDAR de Córdoba y su aptitud agronómica. *Tecnología del Agua* 172: 20-27.
- Polo, M.J., R. Ordóñez y J.V. Giráldez. 1999. Copper and zinc adsorption by sewage sludge-treated soil in Southern Spain. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 30: 1063-1079.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.