

## CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LA ZNS: DETERMINACIONES EN LABORATORIO Y ENSAYOS “IN SITU” EN UNA PARCELA AGRÍCOLA DE ARGANDA DEL REY (MADRID)

M. E. Jiménez Hernández<sup>1</sup>, A. de la Losa Román<sup>1</sup>, M. I. Valverde Asenjo<sup>2</sup>, L. Moreno Merino<sup>1</sup>, y S. Castaño Castaño<sup>1</sup>

1: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).  
C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (España).  
e-mail: e.jimenez@igme.es, a.delalosa@igme.es, l.moreno@igme.es, s.castano@igme.es

2: Departamento de Edafología. Facultad de Farmacia.  
Universidad Complutense de Madrid.  
Plaza Ramón y Cajal s/n. 28040 Madrid.  
e-mail: mivalver@pdi.ucm.es

**Palabras clave:** Ensayos de Infiltración, Carga Constante, Conductividad Hidráulica Saturada, Curvas de Retención Hídrica, Zona No Saturada (ZNS)

**RESUMEN.** *Este trabajo se enmarca dentro de un proyecto que estudia, desde una perspectiva multidisciplinar, el impacto ambiental y sanitario del uso de lodos de depuradora en terrenos agrícolas. Para evaluar la posible afección a las aguas subterráneas es necesario disponer de un modelo de flujo y transporte de contaminantes para la zona experimental, que se localiza en una finca agrícola en Arganda del Rey (Madrid). Los resultados que se describen en esta comunicación forman parte de los ensayos realizados para la caracterización de las propiedades hidráulicas del suelo y la zona no saturada (ZNS) en la parcela experimental. Se han obtenido valores de conductividad hidráulica saturada del terreno a partir de ensayos de infiltración “in situ” a diferentes profundidades y de medidas en laboratorio sobre muestras inalteradas. Por otro lado, se han determinado las curvas de retención hídrica en los primeros 30 cm y se ha llevado a cabo la caracterización granulométrica y las medidas de densidad aparente hasta una profundidad de 200 cm.*

**ABSTRACT.** *This work is included in a multidisciplinary project that studies the environmental and health impact of the application of sewage sludge on agricultural lands. A model for flow and pollutant transport is necessary to assess the possible affection to groundwater in the experimental area, which is located in a agricultural land in Arganda del Rey (Madrid). This paper reports the results of the experiments performed in order to characterize the hydraulic properties of soil and unsaturated zone in the experimental plot. Values for the saturated hydraulic conductivity of soil at different depths have been obtained by means of both “in situ” infiltration tests and laboratory measurements using undisturbed samples. On the other hand, soil water retention curves until 30 cm depth, and granulometric analysis and bulk density values until 200 cm depth have been determined.*

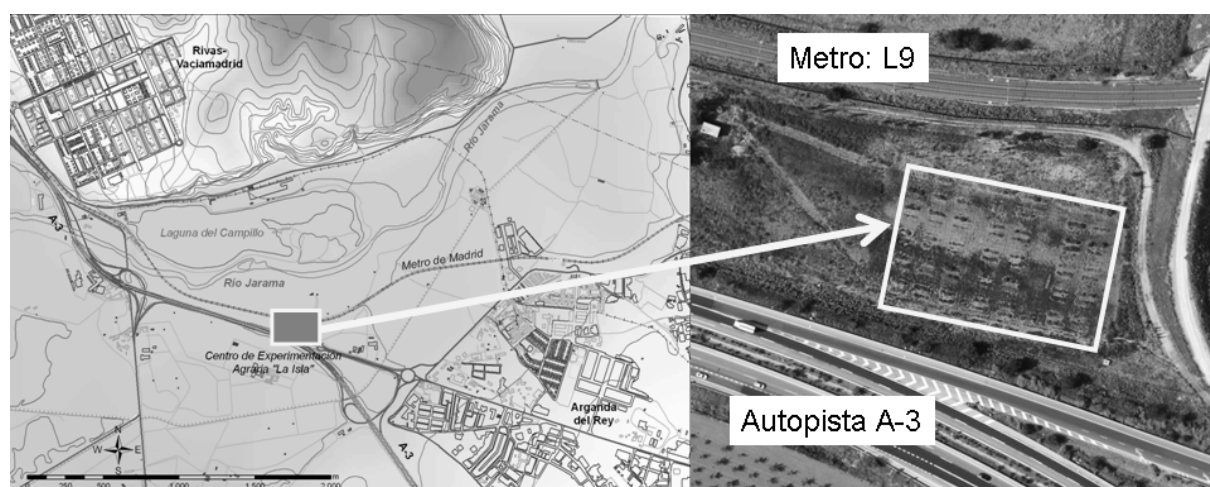
### 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de lodos de depuradora al suelo con fines agrícolas o forestales es la principal salida contemplada en el Plan Nacional de Lodos de Depuradora del Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Esta utilización, además, resulta una opción económica para el tratamiento de estos residuos. Sin embargo, este uso de los lodos puede llevar asociado riesgos de contaminación del medio receptor, el suelo, y posibles efectos nocivos tanto sobre aguas, vegetación, animales como sobre el propio ser humano.

El proyecto en el que se enmarca este trabajo aborda desde la perspectiva de la bioseguridad, el estudio de los problemas inherentes al empleo del suelo como receptor de sustancias potencialmente contaminantes. Uno de los

principales objetivos de este proyecto es la creación de un modelo experimental que permita validar los modelos de flujo y transporte de contaminantes en un suelo en el que se aplican lodos de depuradora. Previamente, es necesario abordar la caracterización de las propiedades hidráulicas del medio receptor. Los trabajos se han llevado a cabo en la finca experimental “La Isla” del IMIDRA (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario) en Arganda del Rey, al sureste de la Comunidad de Madrid (Figura 1). En ella, se han definido parcelas de tratamiento y parcelas control. Las primeras están destinadas a la aplicación de diferentes cargas de lodos de depuradora de tipo aerobio y anaerobio, y las segundas, sin aplicación de lodos, a la realización de ensayos y toma de muestras para la caracterización de las propiedades físicas, químicas y biológicas del medio que definen las condiciones previas a los tratamientos.

La parcela agrícola “La Isla” presenta una superficie aproximada de 0,5 hectáreas y se sitúa sobre las terrazas bajas del río Jarama, cuyo curso discurre al norte de la misma. Estas terrazas se encuentran en la actualidad muy presionadas por actividades de carácter antrópico. Los materiales presentes en la zona de trabajo están constituidos por litologías de carácter detrítico depositados en estratos horizontales pertenecientes a sedimentos de origen fluvial principalmente.



**Figura 1.** Plano de situación (izquierda) y fotografía aérea (derecha) de las parcelas en la zona de estudio en Arganda del Rey (Madrid)

Este trabajo muestra los primeros resultados de los ensayos realizados para la caracterización de las propiedades hidráulicas del suelo y ZNS en la parcela experimental. Se han realizado, por un lado, ensayos de infiltración “in situ” con anillo simple a diferentes profundidades para estimar la conductividad hidráulica saturada. Por otro lado, se han caracterizado granulométricamente los materiales extraídos en testigo continuo hasta 200 cm. Por último, se han determinado en laboratorio las curvas de retención hídrica, la conductividad hidráulica saturada y la densidad aparente en muestras inalteradas de suelo extraídas en los primeros 30 cm desde la superficie.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos en campo y las diferentes campañas de muestreo se han llevado a cabo durante mayo de 2007 y abril- julio de 2008.

Para los ensayos de infiltración de anillo simple se ha utilizado un cilindro de acero de 33 cm de diámetro y 40 cm de altura. Los ensayos de infiltración se han realizado a carga constante, en superficie y a diferentes profundidades mediante la apertura de zanjas con retroexcavadora a 20, 40, 75 y 160 cm de profundidad. Los valores de la conductividad hidráulica saturada se han obtenido a partir del análisis de la cinética de infiltración experimental mediante el método de ajuste de Wu (1999).

Para la descripción granulométrica de los materiales estudiados se han tomado 3 testigos continuos, hasta una

profundidad de 200 cm, mediante martillo percutor con tomamuestras tipo COBRA embutidos en tubos de polietileno. De cada uno de los testigos se han separado 40 muestras tomadas cada 5 cm para determinar la variación de la textura y de la densidad aparente con la profundidad. Las fracciones arenosas se han separado mediante tamizado en seco y las fracciones limo y arcillas se han determinado por el método de la pipeta de Robinson (Van Reeuwijk, 2002).

Las determinaciones en laboratorio de la densidad aparente, la curva de retención hídrica y la permeabilidad saturada se han realizado sobre muestras inalteradas de 100 cm<sup>3</sup> tomadas a tres profundidades diferentes: 0-10 cm, 15-20 cm y 20-30 cm. Para tomar estas muestras inalteradas se ha empleado una sonda manual Eijkelkamp utilizando cilindros metálicos normalizados (dimensiones: 53 mm de diámetro exterior y 50 mm de altura).

La densidad aparente se ha determinado por gravimetría sobre el suelo seco en estufa a 105 °C durante 16-24 horas (Van Reeuwijk, 2002), empleando al menos 3 réplicas para cada profundidad ensayada.

Las determinaciones de los puntos de las curvas de retención hídrica, o curvas pF, se han realizado empleando el método del recipiente de tensión hídrica para valores de pF ≤ 2,7 y el método de la membrana a presión para valores de pF ≥ 3,0. El contenido hídrico de la muestra en equilibrio a cada valor de pF se determina gravimétricamente, en relación con la masa del suelo seco en horno a 105 °C durante 16-24 horas (Van Reeuwijk, 2002). Para el intervalo entre pF = 0 (saturación) y pF 2,0 (100 hPa) se ha utilizado la caja de arena (Eijkelkamp, modelo 08.01), continuando la succión hasta pF 2,7 (500 hPa) en la caja de arena/caolín (Eijkelkamp, modelo 08.02.SA). Las determinaciones entre pF 3,0 (1000 hPa) y pF 4,2 (15500 hPa) se han realizado en un aparato de membrana a presión o cámara de Richards (Eijkelkamp, modelo 08.03). Los ensayos se han llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos descritos por el fabricante para cada una de estas técnicas, empleando entre 3 y 5 réplicas para cada profundidad ensayada.

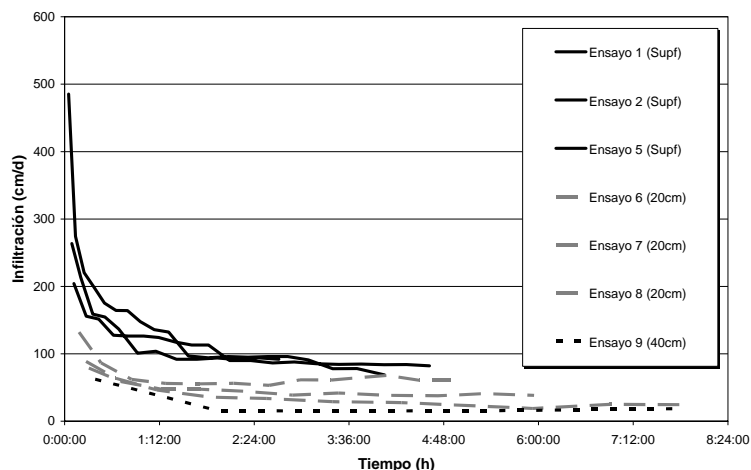
Las medidas en laboratorio de la conductividad hidráulica saturada de muestras inalteradas se han realizado con un permeámetro de laboratorio (Eijkelkamp, modelo 09.02) con capacidad para 5 muestras, siguiendo el protocolo descrito por el fabricante para ensayos a carga constante (adecuado para valores de permeabilidad saturada superiores a 1 cm/d). Para cada profundidad estudiada se han utilizado al menos tres réplicas, ensayando diferentes valores de carga entre 0,8 y 2,0 cm.

Los ensayos de laboratorio se han realizado en el Departamento de Edafología de la Universidad Complutense de Madrid.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

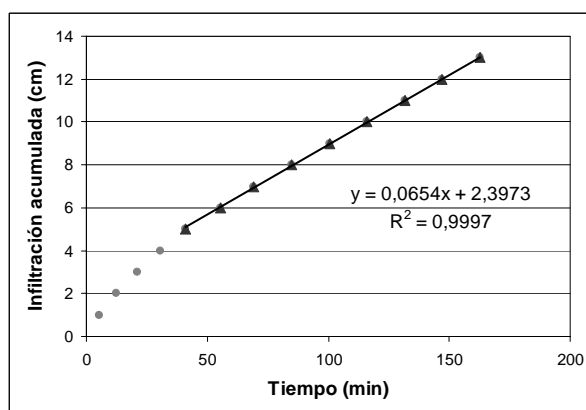
#### **3.1. Ensayos de infiltración**

En la parcela experimental se han identificado de visu los siguientes materiales: suelo agrícola arado (hasta aproximadamente 25 cm de profundidad), arena fina limosa color ocre (de 25 a 110 cm), alternancia de niveles finos de arenas medias y limos de color pardo (de 110 hasta unos 130 cm) y arenas medias y gruesas con clastos visibles de cuarzo, yeso y micas (a partir de unos 130 cm). Para realizar los ensayos con infiltrómetro de anillo simple a carga constante se han seleccionado las siguientes profundidades: en superficie, a 20, 40, 75 y 160 cm. Al representar los datos de los ensayos en forma de gráficos de infiltración (cm/d) frente a tiempo se han obtenido las curvas características, con un descenso inicial de la infiltración hasta estabilizarse en torno a un valor constante cuando se alcanza la saturación del medio (Figura 2).



**Figura 2.** Ejemplos de curvas experimentales de los ensayos de infiltración a diferentes profundidades.

Para calcular la conductividad hidráulica saturada se han empleado las ecuaciones de Wu y Pan (1997) y Wu et al. (1999). Los autores proponen una ecuación generalizada de infiltración para ensayos con infiltrómetro de anillo simple, obtenida a partir de la ecuación de Richards aplicando los factores de escala apropiados para tiempo y espacio (Wu y Pan, 1997). Cuando se cumple la condición de saturación del medio (estado estacionario), el tramo final de la representación de los valores de infiltración acumulada respecto al tiempo se ajusta a una recta (Wu et al., 1999). En la Figura 3 se muestra uno de los ajustes llevado a cabo, como ejemplo del análisis realizado en cada uno de los 11 ensayos de infiltración.



**Figura 3.** Ejemplo de ajuste según el método de Wu sobre el gráfico de la infiltración acumulada frente al tiempo construido con los datos experimentales de uno de los un ensayos de infiltración.

De acuerdo al modelo, los valores de la conductividad hidráulica saturada,  $K_s$ , pueden calcularse con la siguiente ecuación:

$$K_s = \frac{A}{(a \cdot f)} \quad (1)$$

Donde “A” es la pendiente de la recta de ajuste, “a” es una constante adimensional determinada empíricamente ( $a = 0.9084$ ) y “f” un factor que depende de las dimensiones del cilindro y que se calcula

mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{H + 1/\alpha}{d + r/2} + 1 \quad (2)$$

Siendo “d” la profundidad de inserción del cilindro (cm), “r” el radio del anillo de infiltración (cm), “H” la carga de agua en el cilindro y “ $\alpha$ ” un parámetro que depende del tipo de material. Para los materiales ensayados en este estudio se han los valores de  $\alpha = 0,36$ , aplicable a arenas, arena margosa y arena fina,  $\alpha = 0,12$ , válido para marga y marga arenosa fina (Elrick y Reynolds, 1992).

Los valores obtenidos para  $K_s$  para cada una de las profundidades ensayadas se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Valores de  $K_s$  de los ensayos de infiltración realizados a diferentes profundidades. En el caso de ensayos replicados, junto a los valores promedio se indica el intervalo de confianza al 95%.

| Profundidad ensayo | Ensayo | $K_s$ (cm/d) | PROMEDIO     |
|--------------------|--------|--------------|--------------|
| Superficial        | 1      | 43,5         | 32 ± 13 cm/d |
|                    | 2      | 40,6         |              |
|                    | 3      | 21,9         |              |
|                    | 4      | 10,5         |              |
|                    | 5      | 42,0         |              |
| 20 cm              | 6      | 27,6         | 19 ± 9 cm/d  |
|                    | 7      | 19,3         |              |
|                    | 8      | 11,2         |              |
| 40 cm              | 9      | 7,4          | 7,4 cm/d     |
| 75 cm              | 10     | 99,5         | 99,5 cm/d    |
| 160 cm             | 11     | 218          | 218 cm/d     |

Los resultados obtenidos muestran que la conductividad hidráulica saturada disminuye ligeramente con la profundidad durante los primeros 40 cm (valores de 32 a 7,4 cm/d). Sin embargo, a mayores profundidades se observa un incremento en la permeabilidad del medio, con un aumento notable de los valores de  $K_s$  (de 100 a 218 cm/d al profundizar desde 75 a 160 cm). Este comportamiento puede explicarse por el efecto del arado del terreno, ya que se favorece que a profundidades próximas a 40 cm se acumulen materiales finos procedentes del lavado desde la superficie.

En el apartado 3.3 se muestran los valores de  $K_s$  obtenidos mediante el permeámetro en el laboratorio y se comparan con los resultados de conductividad hidráulica saturada obtenidos en campo.

### 3.2. Análisis granulométrico y densidad aparente en testigo continuo

La descripción textural de las muestras obtenidas mediante testigos continuos se ha realizado de acuerdo a la clasificación ISSS (Dewis y Freitas, 1970; Porta et al, 1994). En los testigos de 200 cm analizados se han identificado cambios texturales a las siguientes profundidades: 25 ± 5, 105 ± 5, 145 ± 5 cm. En la Tabla 2 se muestran los porcentajes promedio de arena gruesa (AG), arena fina (AF), limo (L) y arcilla (Arc) característicos de cada uno de los intervalos de profundidades identificados.

**Tabla 2.** Resultados del análisis granulométrico

| Profundidad (cm) | % AG      | %AF    | % L       | % Arc   | TEXTURA         |
|------------------|-----------|--------|-----------|---------|-----------------|
| 0-25             | 2,4 ± 0,2 | 39 ± 1 | 30 ± 1    | 29 ± 1  | Arcillosa       |
| 25-105           | 1,5 ± 0,7 | 61 ± 7 | 17 ± 5    | 21 ± 2  | Franco arcillo- |
| 105-145          | 34 ± 4    | 36 ± 5 | 12 ± 2    | 18 ± 1  | Franco arcillo- |
| 145-200          | 81 ± 4    | 9 ± 4  | 0,6 ± 0,3 | 9,4 ± 1 | Arenosa         |

El análisis granulométrico muestra la predominancia de las fracciones arcillosas y arcillo-arenosas de grano fino predominantemente hasta una profundidad de 145 cm. A partir de los 145 cm, la fracción arenosa presenta una granulometría más gruesa, pasando a ser arenas medias a gruesas.

Por otro lado, se ha determinado la densidad aparente en los testigos continuos cada 5 cm, observándose,

que este parámetro aumenta con la profundidad. En las muestras más superficiales, hasta 15 cm, los valores representativos son  $1,1 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ; desde 15 cm hasta 105 cm la densidad típica es  $1,3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , aumentando hasta  $1,4 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  para el tramos de 105 hasta 145 cm, y  $1,5 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  para el tramos de 145 hasta los 200 cm.

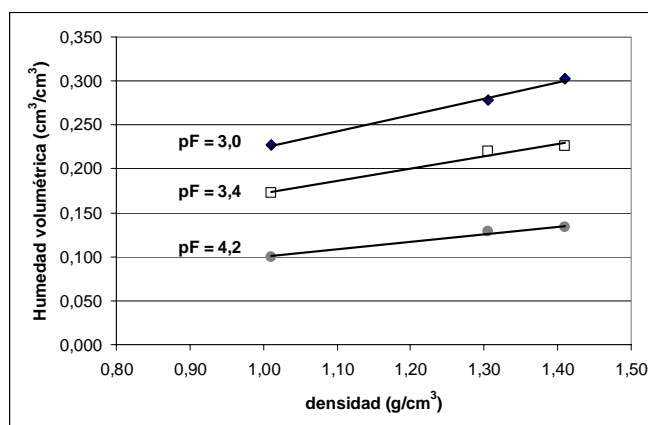
### 3.3. Curvas de retención hídrica, conductividad hidráulica saturada y densidad aparente en muestra inalterada en laboratorio

Se ha abordado una caracterización con mayor detalle de las propiedades hidráulicas del terreno en los primeros 30 cm de profundidad determinando en laboratorio las curvas de retención hídrica y la conductividad hidráulica saturada. Estos ensayos se han realizado con muestras inalteradas recogidas a tres profundidades diferentes (0-10 cm, 10-15 cm y 20-30 cm). Para estas muestras se ha determinado también la densidad aparente. En la tabla 3 se muestra un resumen de estos resultados.

**Tabla 3.** Valor promedio e intervalo de confianza (95%) para la humedad volumétrica ( $\theta$ ) a valores de pF característicos, la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) y la densidad aparente ( $\rho_a$ ), determinados en laboratorio sobre muestras inalteradas de suelo.

| Profundidad (cm) | $\theta$ a pF = 0,0<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\theta$ a pF = 2,0<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\theta$ a pF = 3,0<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $\theta$ a pF = 4,2<br>( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | $K_s$<br>(cm/d) | $\rho_a$<br>( $\text{g/cm}^3$ ) |
|------------------|--|--|--|--|-----------------|---------------------------------|
| 0 - 10           | $\cong 0,5$  | $\cong 0,3$  | $0,227 \pm 0,005$                                    | $0,100 \pm 0,001$                                    | $223 \pm 64$    | $1,01 \pm 0,05$                 |
| 10 - 15          | $0,51 \pm 0,02$                                      | $0,37 \pm 0,02$                                      | $0,279 \pm 0,002$                                    | $0,129 \pm 0,001$                                    | $29 \pm 9$      | $1,31 \pm 0,01$                 |
| 20 - 30          | $0,43 \pm 0,01$                                      | $0,36 \pm 0,02$                                      | $0,302 \pm 0,002$                                    | $0,133 \pm 0,001$                                    | $7 \pm 1$       | $1,41 \pm 0,02$                 |

La curva de retención establece la relación entre el potencial mátrico y la humedad volumétrica de un suelo, y depende la fuerza que ejerce la matriz edáfica para retener un volumen determinado de agua. Para las tres profundidades ensayadas se han determinado las curvas características de desecación en el intervalo de pF entre 0 y 4,2. En la Tabla 3 se muestran los valores del contenido volúmico de agua para algunos puntos característicos de la curva como el de saturación (pF = 0), capacidad de campo (pF = 2,0) y punto de marchitez permanente (pF = 4,2). En la región de potencial mátrico elevado, entre pF 3,0 y 4,2, se observa que para cada valor de pF dado el contenido de humedad aumenta al aumentar la profundidad, es decir, en el mismo sentido en el que aumenta la densidad aparente. Al representar  $\theta$  frente a la densidad aparente (Figura 4) se obtienen ajustes lineales aceptables para los valores de pF ensayados en este intervalo ( $r^2 = 0,997, 0,976$  y  $0,984$  para pF = 3,0, 3,4 y 4,2, respectivamente).



**Figura 4.** Ajuste lineal de las representaciones del contenido volumétrico de humedad para los valores de pF entre 3,0 y 4,2 frente a la densidad aparente.

En la región de succiones moderadas y bajas (pF < 3,0), no han podido hacerse medidas con precisión

para las muestras superficiales menos compactas, ya que presentaban tendencia a colapsar durante los ensayos en la caja de arena tras la saturación. Para las muestras entre 10 y 30 cm, se observa que los contenidos de humedad en saturación y a capacidad de campo disminuyen con la profundidad al aumentar la densidad.

En cuanto a la conductividad hidráulica saturada,  $K_s$ , los valores experimentales se han obtenido en las condiciones de laboratorio a una temperatura entre 19 °C y 24 °C. En la Tabla 3 se muestran los promedios de los valores de  $K_s$  calculados a 20 °C, una vez aplicado el factor de corrección correspondiente a la variación de la viscosidad del agua con la temperatura (en nuestras condiciones de ensayo, los factores de corrección han variado entre 0,99 y 1,11). Los resultados obtenidos en el intervalo de profundidad de 0 a 30 cm muestran una tendencia decreciente de la conductividad hidráulica saturada a medida que aumenta la densidad aparente del material. Se observa además, en todas las profundidades ensayadas, una elevada variabilidad de los resultados. Para la profundidad de 0-10 cm, los valores de  $K_s$  medidos varían entre 130 y 320 cm/d, para la profundidad de 10-15 cm entre 7 y 53 cm/d, y para la profundidad de 20-30 cm el rango de variación de los valores se encuentra entre 4 y 11 cm/d. Al comparar estas conductividades hidráulicas saturadas con las medidas en los ensayos de infiltración “in situ”, se observa que los valores son del mismo orden de magnitud respecto a las profundidades de 20 y 40 cm, pero no para las medidas superficiales (0-10 cm). Los valores tan altos obtenidos en laboratorio pueden deberse a la baja compactación que presenta el material más superficial, y a que en las medidas en laboratorio no se ve afectado por el material subyacente que presenta menor  $K_s$ .

#### 4. CONCLUSIONES

Con el fin de elaborar y validar un modelo que simule el flujo y transporte de contaminantes en un terreno agrícola en el que aplican lodos de depuradora, se han determinado experimentalmente las propiedades hidráulicas del medio. Se han determinado las siguientes características del suelo hasta una profundidad máxima de 200 cm: textura, densidad aparente, curvas de retención hídrica y conductividad hidráulica saturada

La descripción de materiales realizada de visu concuerda con las texturas obtenidas a partir del análisis granulométrico realizado en laboratorio: arcillosa gruesa (0-25 cm), franco arcillo-arenosa (25-145) y arenosa (145-200cm). La densidad aparente aumenta con la profundidad, desde valores en superficie próximos a 1,1 g/cm<sup>3</sup> hasta valores de 1,5 g/cm<sup>3</sup> a 200 cm de profundidad. El mayor incremento se produce en los primeros 30 cm, donde se alcanza una densidad aparente próxima a 1,4 g/cm<sup>3</sup>.

En cuanto a las curvas de retención hídrica, se han determinado los contenidos de humedad volumétrica para muestras de 0 a 30 cm de profundidad en el intervalo de pF entre 0 y 4,2. El ajuste de estas curvas permitirá obtener los parámetros para calcular la conductividad hidráulica no saturada (van Genuchten, 1980). Para valores de pF entre 3,0 y 4,2 se ha observado que el contenido de humedad aumenta al aumentar la profundidad. Sin embargo, en condiciones de saturación (pF = 0) y capacidad de campo (pF = 2,0) la humedad volumétrica disminuye con la profundidad.

Al analizar la variación de la conductividad hidráulica saturada con la profundidad se observa un cambio de tendencia a una profundidad de unos 40 cm asociada a los efectos del arado del terreno. Los valores de  $K_s$  determinados mediante ensayos de infiltración “in situ” hasta 40 cm varían desde 32 a 7.5 cm/d (en el orden de 10<sup>-4</sup> cm/s). Las medidas de  $K_s$  realizadas en laboratorio para profundidades entre 10 y 30 cm proporcionan resultados del mismo orden de magnitud. En la bibliografía se describen para intervalos de  $K_s$  entre 3 y 50 cm/d como permeabilidades de tipo baja a moderadamente baja, características de limos y arenas limosas (Klute, 1965). Por otro lado, a profundidades mayores, desde 40 hasta 160 cm, se observan valores de conductividad hidráulica saturada típicos de arenas que varían desde 100-220 cm/d (en el orden de 10<sup>-3</sup> cm/s). Estos valores de  $K_s$  quedarían dentro del intervalo de 50 a 300 cm/d, descritos para materiales con permeabilidad media.

*Agradecimientos.* Las experiencias realizadas forman parte de los trabajos del proyecto CGL2006-13915/CLI financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Los autores quieren agradecer la colaboración y facilidades prestadas por el personal del IMIDRA.

## REFERENCIAS

- Dewis, J. y Freitas, F., 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. *Boletín sobre suelos, N° 10*. Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 252p.
- Elrick, D.E. y Reynolds W.D., 1992. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. P. 1-24 en C.G. Topp et al. (eds.). *Advances In measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. 30 SSSA, Madison, WI.
- Klute, A., 1965. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. P. 210-221 en Black, C.A. et al. (eds.). *Methods of soil analysis, part I. Physical and Mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. American Society and Agronomy, Inc. Publ. Madison, WI.
- Porta, J., López-Acevedo, V. y Roquero, C., 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, 807p.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, p 892-898.
- Van Reeuwijk, L.P., 2002. Procedures for Soil Analysis, *ISRIC (Internacional Soil Reference and Information Centre)*, 6ª Edición, 120p.
- Wu, L. y Pan, L., 1997. A Generalized Solution to Infiltration from Single-Ring Infiltrimeters by Scaling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1318 – 1322.
- Wu, L., Pan, L., Mitchell, J. y Sanden B., 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 788 – 792.