

PROPIEDADES FÍSICAS E HIDRÁULICAS DE LA ZNS EN EL PARQUE NACIONAL DE LAS TABLAS DE DAIMIEL

H. Aguilera, L. Moreno, E. Jiménez, A. De la Losa y S. Castaño

Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid (España).

e-mail: h.aguilera@igme.es, l.moreno@igme.es, e.jimenez@igme.es, a.delalosa@igme.es, s.castano@igme.es

Palabras clave: Absorción Capilar, Conductividad Hidráulica a Saturación, Curvas de Retención, Densidad Aparente, Infiltración, Repelencia.

RESUMEN. *Se describen las características físicas del suelo más relevantes: densidad aparente, porosidad, conductividad hidráulica a saturación, capacidad de infiltración, curvas de retención de humedad, tasa de humectación capilar y repelencia al agua de cinco tipos funcionales de suelo descritos en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. Los resultados obtenidos indican elevadas capacidades generalizadas de infiltración en condiciones de campo pero también de retención de humedad. El contenido y tipo de materia orgánica se perfila como el factor más determinante a la hora de caracterizar las propiedades físicas de cada material tipo, ya que su presencia favorece la infiltración, pero propicia también la aparición de repelencia, que inhibe la absorción capilar, especialmente en la turba.*

ABSTRACT. *Soil most relevant physical properties are described: bulk density, porosity, hydraulic conductivity at saturation, infiltration capacity, moisture retention curves, wetting rate and soil water repellency of five soil functional types described in the Tablas de Daimiel National Park. Results show high infiltration capacities under field conditions but also high moisture retention. Content and type of organic matter seems to be the most important factor for characterizing physical properties of each soil material, because it favours infiltration but also the occurrence of soil water repellency which inhibits capilar absorption, particularly in peat.*

1. INTRODUCCIÓN

La inversión del gradiente hidráulico en el entorno del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel (PNTD), provocado, principalmente, por la explotación intensiva del acuífero de la Mancha occidental y el consiguiente descenso de los niveles freáticos, ha favorecido la aparición de una ZNS generalizada y ha convertido al Parque en una extensa zona de recarga (Moreno et al. 2007). Este hecho hace que las aguas que llegan al PNTD tienden a infiltrarse rápidamente, con lo que aumenta el riesgo de desecación (agravado por el cambio climático) y el de contaminación de las aguas subterráneas. En este contexto parece inmediato preguntarse qué papel representa la ZNS como almacén y modulador del flujo de agua, nutrientes y contaminantes hacia la zona saturada. El objetivo de este trabajo se centra en la caracterización de las propiedades físicas más relevantes de los suelos que forman la ZNS del PNTD (capacidad de infiltración, conductividad hidráulica a saturación, porosidad eficaz, densidad aparente, curvas de retención de humedad, repelencia y tasa de humectación capilar).

Como unidades elementales de trabajo se han definido unos tipos funcionales de suelos en el PNTD (Figura 1) atendiendo a criterios de comportamiento hidráulico (Aguilera et al. 2009). Se han descrito cuatro tipos principales con propiedades físico-químicas diferenciadas: ovas (sedimentos carbonatados de origen biogénico), arcillas (de origen heredado y fluvial), limos (lechos fluviales) y turba (acumulación de materia orgánica en condiciones reductoras). Las propiedades que caracterizan cada tipo están determinadas, en primer lugar por el material original que ha formado el suelo, pero a este dominio litológico se superponen otros factores, principalmente la antropización (desecación, compactación) y la edafización, que pueden llegar a dominar sobre el control litológico. En este sentido, se han distinguido las ovas limpias, situadas en zonas de tablazo abierto sin cobertera vegetal debido a las labores de siega anual de carrizo, de las ovas edafizadas o “sucias”, que presentan

un menor grado de compactación y un mayor contenido en materia orgánica en superficie, procedente principalmente, de la descomposición del carrizo. También se consideran de forma independiente las zonas de alternancias de ovas limpias y turba, aunque los análisis de propiedades físicas se han llevado a cabo para cada material por separado.

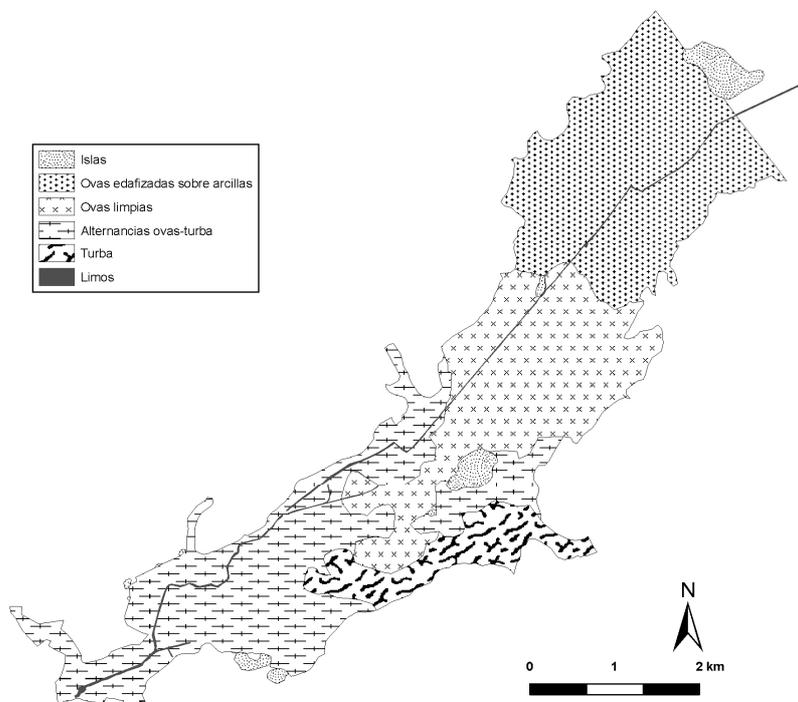


Figura 1. Tipos funcionales de suelo definidos dentro del límite del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel (PNTD).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos de infiltración se llevaron a cabo entre enero y abril de 2008 utilizando un infiltrométero de anillo simple de acero de 33 cm de diámetro y 40 cm de altura. En total se realizaron 43 ensayos (al menos 6 por tipo de suelo) en superficie a carga constante de entre 10 y 12 cm. Los valores de la conductividad hidráulica a saturación se han obtenido a partir del análisis de la cinética de infiltración experimental mediante el método de ajuste de Wu et al. (1999). Tras representar los valores de infiltración acumulada con respecto al tiempo de cada ensayo, ajustando el tramo final a una recta (condición de saturación del medio), se calcula la conductividad hidráulica a saturación, K_s , a partir de la siguiente ecuación:

$$K_s = A/(a*f) \quad (1)$$

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 las siguientes expresiones:

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

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 α un parámetro que depende del tipo de material. Para los materiales ensayados en este estudio se han tomado los valores de $\alpha = 0,36$, aplicable a arenas, arena margosa y arena fina, y $\alpha = 0,04$, válido para texturas más arcillosas (Elrick and Reynolds, 1992).

La caracterización de la repelencia al agua de los materiales del suelo se ha obtenido a partir de muestras alteradas recogidas en bolsas de polietileno. Para determinar el grado de repelencia se ha utilizado el “Test del Tiempo de Penetración de la Gota de Agua” (WDPT en sus siglas en inglés), a partir de Dekker y Jungerius (1990). El test consiste en observar el tiempo medio que tardan en infiltrar varias gotas de agua destilada añadidas sobre la superficie de una muestra de suelo. Si las gotas infiltran el suelo en menos de 5 segundos se le considera humectable (Tabla 1).

Las determinaciones en laboratorio de densidad aparente y porosidad eficaz, curvas de retención hídrica, permeabilidad saturada y tasa de humectación se han realizado sobre muestras inalteradas de 100 cm³ tomadas en abril y mayo de 2008 con una sonda manual Eijkelkamp empleando cilindros de acero normalizados.

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

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 (caja de arena y caja de arena/caolín) y el método de la membrana a presión para valores de pF ≥ 3,0 (cámara de Richards). El contenido hídrico de la muestra en equilibrio a cada valor de pF se determina gravimétricamente. Se han empleado 3 réplicas para cada tipo de suelo.

Las medidas en laboratorio de la K_s se han realizado con un permeámetro de laboratorio (Eijkelkamp, modelo 09.02) con capacidad para 5 muestras (valores de carga entre 0,4 y 1,9 cm).

El procedimiento para determinar la tasa de humectación capilar del suelo consiste en aplicar una carga constante de aproximadamente -2.5 cm a las muestras inalteradas mientras un equipo registra de forma continua el incremento de peso debido a la absorción de agua. El ensayo se repite tras secar las muestras a distintas temperaturas (25, 65 y 105 C°) para observar el efecto del secado (ej. aparición de repelencia).

La caracterización de repelencia y tasa de humectación del suelo se ha realizado en los laboratorios del Alterra Research Centre de la Universidad de Wageningen (Holanda); el resto de ensayos en el Departamento de Edafología de la Universidad Complutense de Madrid.

Tabla 1. Grados de repelencia al agua de un suelo en base al test WDPT.

Clas	Tiempo de permanencia de la gota	Grado de repelencia
1	< 5 s	Humectable
2	5–60 s	Ligera
3	60–600 s	Fuerte
4	600–3600 s	Severa
5	>1 h	Extrema

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Ensayos de infiltración

Los datos de velocidad de infiltración observados en los ensayos fueron posteriormente ajustados a los modelos empíricos de Horton y el de Kostiakov modificado (Figura 2). El modelo de Horton describe la capacidad de infiltración en base a una ecuación exponencial (Horton, 1940):

$$f = fc + (fo - fc) \exp(-k \cdot t) \quad (3)$$

Donde f es la capacidad de infiltración en mm, fc es la capacidad de infiltración final, es decir, al concluir el ensayo, fo la inicial, k es un parámetro de ajuste (h⁻¹) y t es el tiempo (h). El modelo de Kostiakov modificado es de tipo potencial (Smith, 1972):

$$f = fc + a \cdot t^b \quad (4)$$

Siendo en este caso a y b coeficientes empíricos de ajuste. Con los dos modelos se han obtenido bondades de ajuste muy satisfactorias, con R² superiores a 0,6 en todos los casos y a 0,8 en el 82% de los ensayos. Sin embargo, el modelo de Kostiakov no consigue estimar adecuadamente la capacidad de

infiltración final, f_c , en los casos en que el descenso inicial en la velocidad de infiltración es brusco (Figura 2), obteniéndose valores nulos o incluso negativos. Según Mbagwu (1994), este modelo es adecuado para casos de flujo horizontal (donde el efecto de la gravedad es prácticamente nulo), resultando ineficiente para expresar flujos verticales.

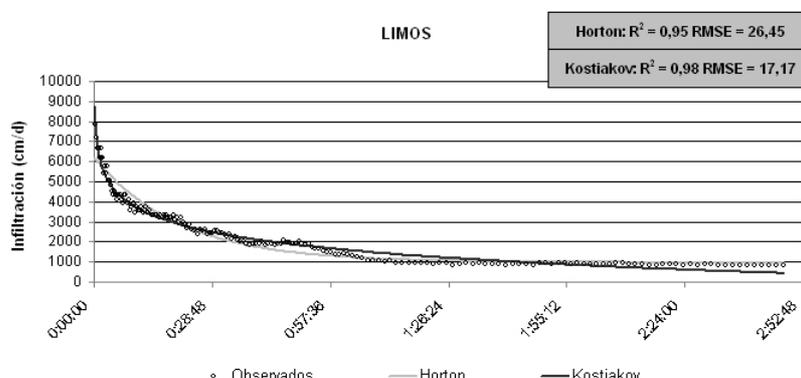


Figura 2. Ejemplo de ajuste de un ensayo de infiltración sobre limos a los modelos de Horton y Kostiakov, con los correspondientes valores del coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE).

En la Figura 3 se observa como la turba y las ovas edafizadas, los dos tipos funcionales con mayor contenido en materia orgánica (Aguilera et al. 2009), son los que muestran los valores medios y de dispersión más elevados para la capacidad de infiltración final. La importancia del contenido en materia orgánica parece evidente si se compara la f_c de las ovas edafizadas con la de las ovas limpias, mucho menor, aunque también hay que tener en cuenta otros factores como son la estructura del suelo (presencia de grietas y raíces en zonas de turba y ovas edafizadas) o la compactación del terreno producida por la siega de carrizo en zonas de ovas limpias. En general, los valores observados son muy altos, presentando las arcillas, lógicamente, las capacidades de infiltración más pequeñas. Destacar la menor dispersión en los materiales con mayor densidad aparente (Tabla 2).

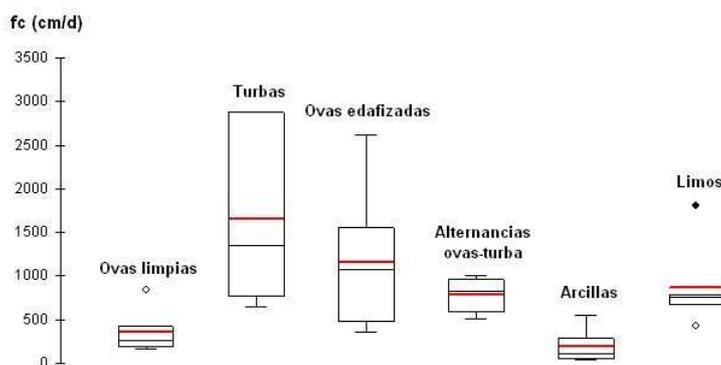


Figura 3. Diagramas de cajas de la distribución obtenida a partir de los datos de los ensayos de infiltración de las capacidades de infiltración final de cada tipo funcional de suelo del PNTD.

En la Figura 4 se muestra uno de los ajustes realizados a los datos de infiltración para estimar la conductividad hidráulica a saturación según el método de Wu et al. (1999). Los valores medios de K_s obtenidos para los diferentes tipos de suelo según este método se muestran en la Tabla 2, resultando sensiblemente inferiores a los de las capacidades de infiltración medias de la Figura 3.

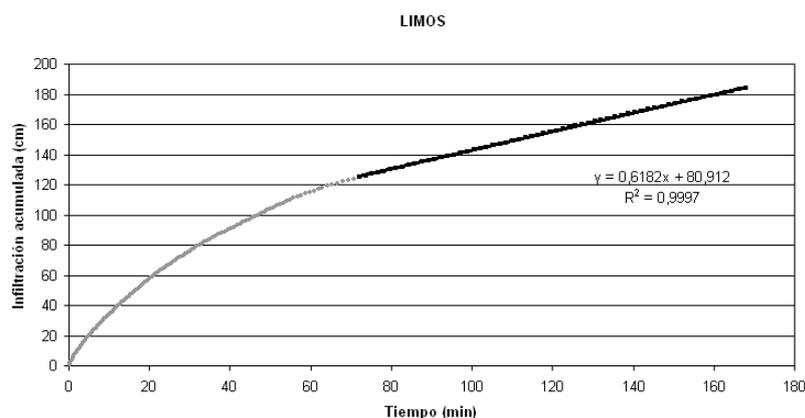


Figura 4. Ejemplo de ajuste según el método de Wu sobre el gráfico de la infiltración acumulada frente al tiempo construido con los datos experimentales del ensayo de infiltración de la Figura 2.

Tabla 2. Valor medio y desviación estándar (entre paréntesis) para la porosidad eficaz (P_e), la densidad aparente (ρ_a) y la conductividad hidráulica a saturación (K_s) a partir del método de ajuste a los datos de infiltración y de los análisis de laboratorio, determinados para los distintos tipos funcionales de suelo del PNTD.

Tipo de suelo	P_e (%)	ρ_a (kg/m ³)	K_s (m/d) ajuste infiltración	K_s (m/d) laboratorio
Ovas limpias	47,6 (3,9)	740 (140)	2,1 (1,5)	0,8 (0,1)
Limos	46,6 (2,7)	910 (300)	2,9 (1,3)	0,4
Turba	32,4 (4,0)	170 (40)	10,4 (6,4)	112,1 (131,9)
Arcillas	23,5 (2,6)	1300 (90)	0,5 (0,4)	1,5
Ovas edafizadas	56,8 (3,7)	660 (50)	8,6 (4,1)	4,8 (3,2)

3.2. Porosidad eficaz, densidad aparente, conductividad hidráulica a saturación y curvas de retención hídrica en muestra inalterada en laboratorio

La Tabla 2 recoge los valores medios y desviaciones obtenidos en las determinaciones de porosidad, densidad aparente y conductividad hidráulica a saturación, para cada uno de los tipos funcionales de suelo definidos. Las porosidades eficaces son, a excepción de las arcillas y la turba, elevadas, acordes a las altas capacidades de infiltración y valores de K_s observados, los cuales definen clases de permeabilidad entre moderada y muy rápida (Klute, 1965). En el caso de la turba, la porosidad secundaria debida a la presencia de grietas, unida a la gran capacidad absorción de agua (ej. hinchamiento) favorecida por la materia orgánica, pueden explicar los altísimos valores de K_s registrados, especialmente en las muestras de laboratorio. Además, los resultados muestran una tendencia decreciente de la K_s a medida que aumenta la densidad aparente del material. Parece ser, por tanto, que la conjunción de bajas densidades con altos contenidos en materia orgánica determinan una estructura menos consistente en turba y ovas edafizadas y, por consiguiente, una mayor capacidad transmisiva.

Por otra parte, al igual que ocurría con las capacidades de infiltración (Figura 3), se observa una elevada variabilidad de los resultados de K_s , especialmente en la turba y las ovas edafizadas. Los valores de K_s medidos en laboratorio son sensiblemente inferiores a los estimados a partir de los ensayos de infiltración “in situ”, quizás mucho más de lo que cabría esperar, a excepción de las arcillas y la turba. Este hecho puede deberse a una mayor dominancia del efecto aleatorio de la porosidad secundaria en muestras pequeñas de tan sólo 100 cm³, y a que las medidas en laboratorio no se ven afectadas por el material

subyacente que, en algún caso, podría presentar menor K_s . De cualquier manera, la discrepancia entre los valores obtenidos por ambos métodos sugiere la necesidad de un estudio más detallado de la K_s .

Los puntos de las curvas pF de retención de humedad en el intervalo entre 0 y 4,2 para cada tipo de suelo se muestran en la Figura 5. Cabe destacar la gran capacidad de retención a valores bajos de pF de ovas edafizadas y limos, especialmente las primeras, que a pF 3,0 aún conservan más de un 50% de humedad. A valores altos de pF como el punto de marchitez permanente (pF = 4,2) los limos, la turba y las arcillas son las que presentan contenidos de humedad más elevados, entorno a un 20%. El aumento generalizado del error en la región de succión entre 2,0 y 2,7 coincide con el paso de las muestras de la caja de arena a la de arena/caolín.

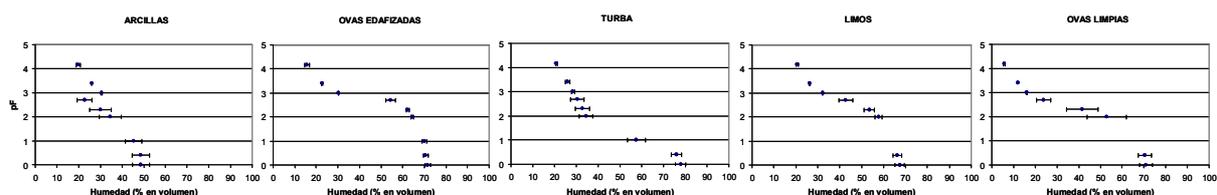


Figura 5. Valores medios (tres réplicas) de los puntos de la curva pF para cada tipo funcional de suelo del PNTD.

3.3. Repelencia del suelo al agua y tasa de humectación capilar

La repelencia del suelo al agua es un fenómeno que está cobrando gran relevancia en el ámbito científico en los últimos años (Dekker et al. 2005). En general se debe al recubrimiento de las partículas del suelo por compuestos orgánicos hidrófugos liberados por las plantas, microbios u hongos. Las consecuencias más importantes son la disminución de la infiltración facilitando así la erosión (Shakesby et al. 2000). Sin embargo, aumenta el riesgo de contaminación del agua subterránea al aparecer vías de flujo preferencial por donde el agua y los solutos percolan más rápido.

El test WDPT para determinar el grado de repelencia al agua de los distintos tipos funcionales de suelo a distintas profundidades se llevó a cabo de dos maneras: tras secar las muestras en estufa a distintas temperaturas (25, 35, 45, 55, 65, 75 y 105 °C), y dejando las muestras secar al aire en un laboratorio a 20°C y humedad relativa entre 35 y 65% durante un mes. En la Figura 6 sólo se muestran los resultados para turba y ovas edafizadas, ya que fueron los únicos materiales que presentaron repelencia, debido, probablemente, a su mayor contenido en materia orgánica. Las muestras superficiales de turba (10-15 cm y 20-25 cm) presentaban un grado de repelencia extremo (clase 5) en las condiciones iniciales de campo. El grado de repelencia disminuyó tras secar las muestras a 25, 35, 45 y 55°C. Las temperaturas de secado a partir de 65°C volvieron a incrementar el grado de repelencia, que pasó a ser extremo a todas las profundidades muestreadas a partir de 75°C. El secado al aire en algunos casos incrementó el grado de repelencia inicial de las muestras superficiales de ligera (clase 2) a severa (clase 4) tras los primeros 5 días, para posteriormente disminuir a fuerte (clase 3) donde se mantuvo constante hasta el final del ensayo.

Las ovas edafizadas sólo presentaron repelencia ligera en la capa superficial (0-10 cm) tras secadas a temperaturas superiores a 55°C. Sin embargo, el secado al aire provocó la aparición de repelencia ligera durante casi todas las medidas en la capa superficial y a partir de los últimos días en las muestras de las capas de 10-20 y 20-30 cm.

Los resultados indican la influencia del tipo de secado sobre la repelencia de los suelos al agua y, por tanto, la necesidad de su caracterización en condiciones de campo. La aparición de repelencia en las ovas edafizadas viene a corroborar el hecho apuntado por Jaramillo (2006) de que los compuestos orgánicos liberados por las plantas del género *Phragmites*, como el carrizo, presentan alta hidrofobicidad.

Por último, se estudió la tasa de humectación capilar de los diferentes tipos de suelo para observar la posible influencia de fenómenos como la repelencia sobre la capacidad de absorción de agua (Figura 7). En general, limos, ovas y arcillas, alcanzan la capacidad de absorción de humedad máxima a las 5 horas de comenzar el ensayo, siendo los limos los que mayor cantidad de humedad absorben (50-70 %), lo cual estaría en concordancia

con la elevadas capacidades de retención observadas en la curva pF.

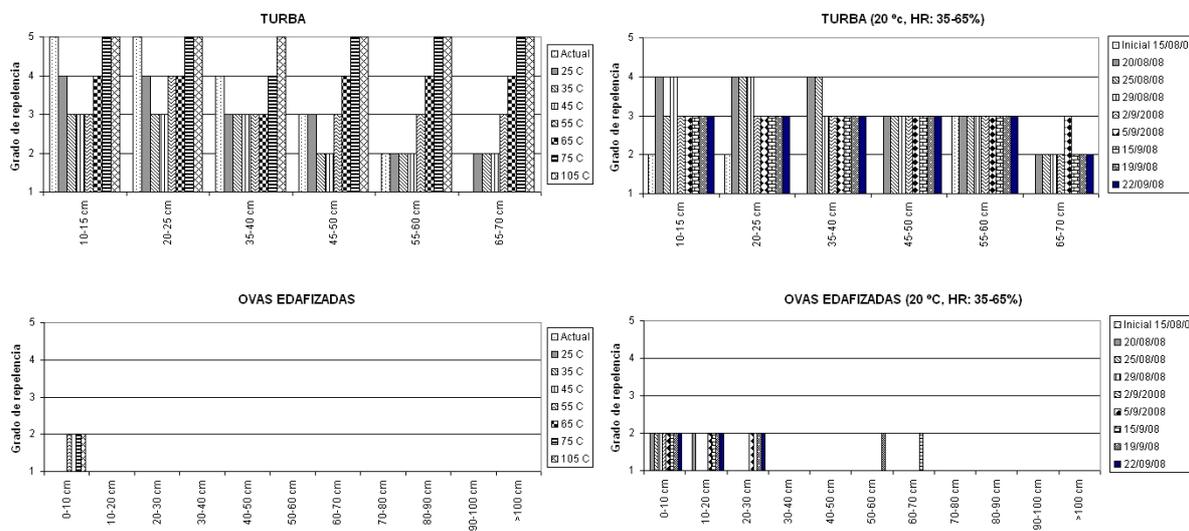


Figura 6. Valores del test WDPT del grado repelencia realizado sobre muestras de turba y ovas edafizadas tomadas a distintas profundidades, mediante el procedimiento de secado en estufa a distintas temperaturas, y dejando secar las muestras al aire.

La turba, por su parte, no consigue en ningún caso absorber más de un 20% de humedad y el tiempo necesario para alcanzar la capacidad máxima es muy superior al de los otros materiales. Esto es debido a la repelencia y en el caso en que ésta es extrema, como tras el secado a 105°C, la capacidad de absorción capilar de agua es prácticamente nula.

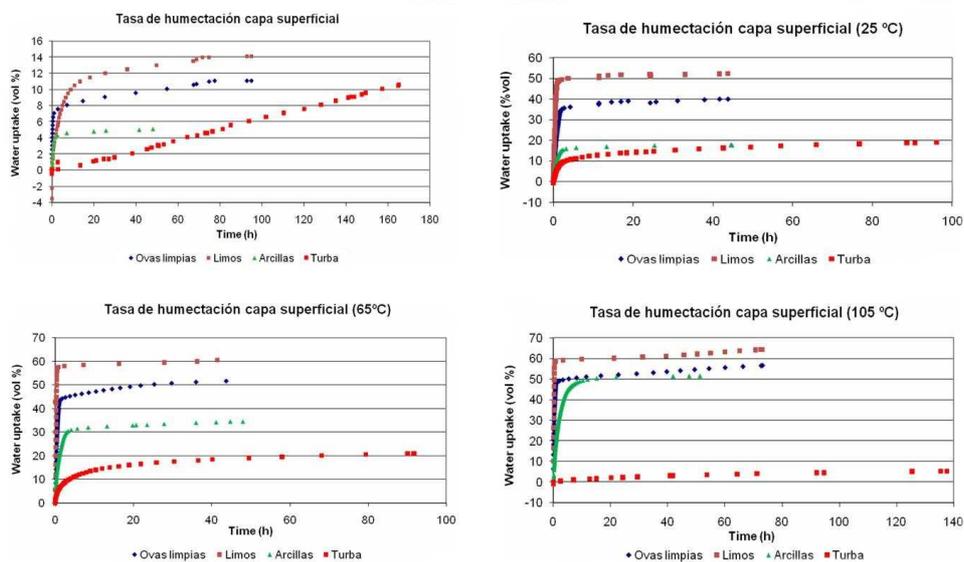


Figura 7. Curvas de tasa de humectación capilar en muestras superficiales de ovas limpias, arcillas, limos y turba, en condiciones iniciales y tras el secado a diferentes temperaturas.

4. CONCLUSIONES

Se han estudiado las propiedades físicas más relevantes de cinco tipos funcionales de suelo que forman la ZNS en el PNTD. Los ensayos de infiltración presentan muy buenos ajustes al modelo de Horton, no así al de Kostiakov cuando el descenso inicial en la tasa de infiltración es pronunciado. Las capacidades de infiltración y las K_s son en general muy altas y muestran gran variabilidad, particularmente en el caso de la turba y las ovas edafizadas, debido a su mayor contenido en materia orgánica, desarrollo de porosidad secundaria y falta de estructura (grietas y raíces de carrizo), y menores densidades aparentes. Las altas tasas de infiltración condicionadas por la inversión del gradiente hidráulico en la zona del PNTD agravan aún más la situación de déficit hídrico del Parque.

La discrepancia entre valores de K_s obtenidos por el método de ajuste de Wu et al. (1999) y los de laboratorio, invitan a un estudio más detallado de este parámetro y de los factores que lo condicionan.

Los cinco tipos de suelo presentan, en general, altas capacidades de retención de humedad a valores bajos de pF (agua gravitacional), especialmente las ovas edafizadas. El ajuste de las curvas pF permitirá obtener los parámetros para calcular la conductividad hidráulica no saturada (Van Genuchten, 1980). También es necesario completar el estudio con los análisis granulométricos.

Aparece repelencia al agua extrema en la turba y ligera en las ovas edafizadas, condicionada por las temperaturas y características del secado, así como del contenido en materia orgánica procedente de la descomposición del carrizo. La repelencia es un factor a tener en cuenta ya que disminuye notablemente la tasa de humectación capilar de la turba.

La presente caracterización de las propiedades físicas del suelo junto con la cuantificación y distribución espacial de nutrientes presentada en el otro artículo que firman los mismos autores, permitirá definir un modelo de funcionamiento de la ZNS en el PNTD en base a los tipos funcionales de suelo descritos.

Agradecimientos. El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro del proyecto CICYT CGL2005-06458-C02-01. Los autores quieren agradecer la colaboración y el apoyo prestado por los gestores y guardas del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, así como a los Departamentos de Física del Suelo del Centro de Investigación Alterra de la Universidad de Wageningen (Holanda) y al de Edafología de la Universidad Complutense de Madrid.

REFERENCIAS

- Aguilera, H., L. Moreno, S. Castaño, E. Jiménez, y A. De la Losa, 2009. Contenido y distribución espacial de nutrientes móviles en la zona no saturada en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel. *Boletín Geológico y Minero de España*. Aceptado para publicación.
- Dekker, L.W., y P.D. Jungerius, 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Supplement*. 18, 173-183.
- Dekker, L.W., K. Oostindie, y C.J. Ritsema, 2005. Exponential increase of publications related to soil water repellency. *Australian Journal of Soil Research*. 43, 403-441.
- Elrick, D.E., y W.D. Reynolds, 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.
- Horton, R. E., 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 5, 399-417.
- Jaramillo, D.F., 2006. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 30 (115), 215-232.
- 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.
- Mbagwu, J.S.C., 1994. Soil physical properties influencing the fitting parameters in Philip and Kostiakov infiltration models. *International Centre for Theoretical Physics, IC/94/97 Internal Report*.
- Moreno, L., S. Castaño, E. Jiménez, H. Aguilera, y A. De la Losa, 2007. Control del efecto de la inversión del flujo vertical (descarga a recarga) sobre la composición química del agua subterránea en el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel. Resúmenes del I Congreso Nacional sobre Cambio Global, Getafe, pág. 30.
- Shakesby, R.A., S.H. Doerr, y R.P.D. Walsh, 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *Journal of Hydrology*. 231-232, 178-191.
- Smith, R.E., 1972. The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. *Journal of Hydrology*. 17, 1-21.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- Van Reeuwijk, L.P., 2002. *Procedures for Soil Analysis*. ISRIC (Internacional Soil Reference and Information Centre). 6ª Edición, 120p.
- Wu, L., L. Pan, J. Mitchell, y B. Sanden, 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 788-792.