

# Estudio del comportamiento hídrico de lodos de serrado de pizarra y descripción mediante el modelo de Van Genuchten

R. Paradelo<sup>(1)</sup>, R. Devesa-Rey<sup>(1)</sup>, A.B. Moldes<sup>(2)</sup> y M.T. Barral<sup>(1)</sup>

(1) Departamento de Edafología e Química Agrícola, Facultade de Farmacia, Campus Sur, 15782 Santiago de Compostela  
remigio.paradelo@usc.es, rosa.devesa.rey@usc.es y mteresa.barral@usc.es

(2) Departamento de Ingeniería Química, E.T.S. de Ingenieros Industriales, Campus Universitario Lagoas Marcosende, 36200 Vigo  
amoldes@uvigo.es

## RESUMEN

Los lodos de serrado de pizarra podrían ser utilizados en las superficies de escombreras como soporte para la revegetación, pues no presentan inicialmente propiedades incompatibles con el desarrollo vegetal. En este trabajo se han determinado sus propiedades hídricas (capacidad de retención de agua y permeabilidad) para conocer el funcionamiento de los procesos de transporte de agua y su contenido en solutos, el suministro de agua a las plantas durante la restauración y su estabilidad frente a la erosión. En este trabajo se determinaron la curva de retención de agua y la conductividad hidráulica saturada de lodos de pizarra, deduciéndose la función distribución de tamaño de poro y la conductividad hidráulica insaturada usando las ecuaciones del modelo de Van Genuchten. La capacidad de retención de agua es mayor que en otros residuos mineros, aunque a valores altos de succión es muy baja, lo que va ligado a la escasez de poros menores de 5  $\mu\text{m}$ . La conductividad hidráulica de los lodos es baja, pero permanece constante desde la saturación hasta capacidad de campo, descendiendo bruscamente a continuación. Estas propiedades implican que para el éxito de la restauración es necesario un estricto control de la humedad, en torno a la capacidad de campo, pues la homogeneidad de tamaño de poro provoca que se pase rápidamente de condiciones de encharcamiento a condiciones de desecación.

Palabras clave: permeabilidad, pizarra, porosidad, residuos mineros, retención de agua

## ***Study of the hydraulic properties of slate processing fines and fitting to Van Genuchten's model***

### ABSTRACT

*Slate processing fines could be used as surface material for the revegetation of slate dumps and tailings, because their properties are compatible with plant growth. Yet, the study of their hydraulic properties (water holding capacity and permeability) is essential for knowledge of processes such as water movement and solute transport, water supply to plants during restoration and stability of dumps against erosion. In this work, the moisture retention characteristic and saturated hydraulic conductivity of the slate processing fines have been determined, and the pore size distribution and unsaturated hydraulic conductivity have been derived from the equations of Van Genuchten. The water holding capacity of the slate processing fines is higher than other mining wastes, but the retention at high suction values is very low, which is linked to the low number of pores under 5  $\mu\text{m}$ . Their hydraulic conductivity is low, and remains unchanged between saturation and field capacity conditions. Thus, a strict control of moisture (around field capacity) is needed for the success of revegetation, because the homogeneity of pore sizes causes the quick pass from water-logged asphyxiating conditions to extreme dryness.*

*Key words: mining wastes, permeability, porosity, roofing slate, water holding capacity*

## Introducción

La explotación de la pizarra es uno de los sectores industriales más importantes de la industria de Galicia, tanto por facturación como por volumen de ventas al exterior, número de empleados y peso dentro de la producción total del Estado. La zona de extracción más importante es la comarca de Valdeorras, en la provincia de Ourense. De ella salen anualmente más de 400.000 Tm de pizarra elaborada, lo que representa aproximadamente las dos terceras

partes de la producción nacional, siendo el primer producto de exportación de la provincia de Ourense (con más del 70% del total) y el quinto de Galicia. La mayoría de las explotaciones (95%) se concentran en el Ayuntamiento de Carballeda, aunque existen naves de elaboración en casi todos los ayuntamientos de la comarca. Los yacimientos de pizarra se explotan a cielo abierto, aprovechándose únicamente entre el 2% y el 5% del material extraído, originándose grandes huecos en las montañas y enormes escombreras en las que se vierten los estériles, situadas en las

zonas próximas a las explotaciones y a las naves de procesado. Las características orográficas, con predominio de pendientes por encima del 10%, unidas a la falta de estructura de los materiales depositados, hacen que muchas escombreras sean inestables, provocando el deslizamiento de los materiales que las componen ladera abajo, y dando lugar en algunos casos a la interrupción de los cauces de los ríos próximos (San Román, 2000).

Siendo la elaboración de pizarra una de las principales actividades industriales de Galicia, así como la causante de algunos de los más graves impactos ambientales, es importante el conocimiento de las propiedades de los residuos que se generan y la posibilidad de su reutilización, con especial atención a la restauración de sus impactos sobre el medio. En trabajos anteriores se ha planteado la posibilidad de usar los residuos finos producidos en las explotaciones de pizarra para elaborar una capa que pueda cubrir las escombreras (la mayoría de ellas formadas por residuos muy gruesos, con poca capacidad de retención de agua y nutrientes) y servir de soporte a la vegetación durante la restauración (Álvarez *et al.*, 2000; Rowe *et al.*, 2005; Paradelo *et al.*, 2007, 2008, 2009). En estos trabajos se observó que los lodos de pizarra presentan como posibles limitaciones a la revegetación la falta de N y P disponibles para las plantas, la ausencia de materia orgánica, y una textura desequilibrada con fuerte predominio de la fracción limo. En trabajos previos (Paradelo *et al.*, 2007; Paradelo *et al.*, 2009) se ha demostrado que el déficit de materia orgánica y nutrientes puede ser corregido mediante la enmienda con compost. Sin embargo, la mejora de las propiedades físicas es difícil y existen pocos trabajos sobre este aspecto, a pesar de que en muchas ocasiones, las propiedades físicas son más limitantes para el desarrollo de la vegetación que la falta de nutrientes o la presencia de sustancias tóxicas. El conocimiento de las propiedades físicas de los materiales es fundamental para conocer el funcionamiento de los procesos de transporte de agua y el contenido en solutos y puede minimizar problemas habituales en restauración de suelos de mina como hinchamiento, formación de costras, infiltración, compactación y degradación de la estructura relacionados con la estabilidad de los depósitos y su susceptibilidad a la erosión (Dollhopf y Postle, 1988). Por tanto en este trabajo se han determinado la curva de retención de agua y la conductividad hidráulica de los lodos de pizarra, con el fin de deducir la función distribución de tamaño de poro y la conductividad hidráulica insaturada de los lodos de pizarra, usando las ecuaciones del modelo de Van Genuchten.

## Materiales y métodos

Los lodos de serrado de pizarra se producen en forma de suspensión acuosa durante la refrigeración de las sierras que dimensionan los bloques de pizarra en las naves de elaboración. El agua usada en estas sierras, junto con las partículas arrastradas, pasa a un decantador en el que se separan las partículas finas; el agua se recircula de nuevo a las sierras, y el lodo se pasa a un filtro-prensa donde se le extrae más agua hasta quedar en un estado fangoso. Posteriormente los lodos son vertidos directamente sobre el suelo en los terrenos adyacentes a las naves de elaboración. En trabajos anteriores se han realizado extensas caracterizaciones de las principales propiedades químicas y físicas de estos lodos, orientadas a su uso en restauración (Álvarez *et al.*, 2000; Paradelo *et al.*, 2008). Aquí se profundiza en la descripción de las características hidráulicas y de retención de agua y porosidad de este material.

Se estudiaron dos muestras de lodos, Irosa 1 e Irosa 2, recogidas en el lugar de vertido de los lodos en la nave de elaboración de la empresa IROSA (Carballada de Valdeorras, Ourense), con diferencia de seis meses entre ambas. Los lodos se secaron al aire, se tamizaron por 2 mm, y se caracterizaron en el laboratorio siguiendo los métodos descritos por Guitián y Carballas (1976) para la textura, densidad real y aparente, y porosidad. La conductividad hidráulica saturada se determinó en un aparato de gradiente constante, como se describe en Klute y Dirksen (1986). La curva de retención de agua de los lodos se obtuvo equilibrando muestras saturadas a diferentes presiones de succión (entre pF 0 y 4,2) y determinando su humedad una vez equilibradas. Se usaron los extractores de Richards para las presiones a partir de pF 2 (Guitián y Carballas, 1976) y el lecho de arena para las presiones menores (Reeve y Carter, 1991). Para determinar la humedad a saturación (pF 0) se dejaron drenar muestras saturadas sobre un tamiz durante una hora (Benito Rueda, 1988).

## Resultados y discusión

Las propiedades generales de las muestras se presentan en la tabla 1. En los lodos hay un claro predominio de la fracción limo, como ocurre en otros residuos que se originan durante el serrado de rocas (Fraser y McBride, 2000; Barral *et al.*, 2005). En el caso de los lodos de pizarra, la homogeneidad textural es además heredada de la roca, pues la mayoría de las pizarras que se explotan son de grano medio y fino (<50  $\mu\text{m}$ ) (Lombardero y Quereda, 1992).

	Irosa 1	Irosa 2
Arena (%)	4,2	5,4
Limo (%)	77,5	84,7
Arcilla (%)	18,3	9,9
Clase textural	Franco-limosa	Limosa
Densidad real (g L <sup>-1</sup> )	3072	2765
Densidad aparente (g L <sup>-1</sup> )	1095	1095
Porosidad total (%)	64	60
Agua útil (%)	45,7	44,4
K <sub>s</sub> 10 <sup>-7</sup> (m s <sup>-1</sup> )	6,7	5,0

Tabla 1. Propiedades generales de las muestras de lodos  
 Table 1. Main properties of the slate processing fines

### Capacidad de retención de agua

Dentro de las propiedades físicas, las que condicionan el movimiento del agua en el suelo son de considerable importancia porque influyen en procesos como la entrada de agua al suelo, el drenaje y la evaporación en superficie (Klute y Dirksen, 1986). La curva de retención de agua, que es la relación entre el potencial matricial y la humedad, es característica para cada suelo o material y describe su capacidad para retener agua en diferentes condiciones. La figura 1 muestra las curvas de retención obtenidas, que presentan la forma típica de suelos limosos (Sillers *et al.*, 2001) e indican una capacidad de retención de agua elevada. La curva de retención consta de tres partes: la zona a valores bajos de presión de succión (zona de saturación capilar) es la parte en la que el suelo permanece saturado debido a fuerzas capilares. En el caso de los lodos de pizarra está zona abarca valores de succión inferiores a pF 2. Cuando se supera este valor, los capilares se vacían progresivamente de agua como consecuencia de la entrada de aire y la pendiente de la curva se incrementa (zona de desaturación), de modo que la humedad se reduce progresivamente entre pF 2 y 3,5. Finalmente, se produce un nuevo cambio de pendiente en las proximidades del valor de humedad residual, donde incrementos de la succión no producen cambios significativos en la humedad, pues el agua está formando una fina película fuertemente retenida sobre las partículas y agregados. Esta última parte se denomina zona de saturación residual, y en ella el movimiento del agua en el suelo tiene lugar principalmente en fase vapor.

Como indicador de la capacidad de los lodos para suministrar agua a las plantas, se define el agua útil como la diferencia entre el agua retenida a pF 2 y a pF 4,2, que representa el agua que no está lo suficiente-

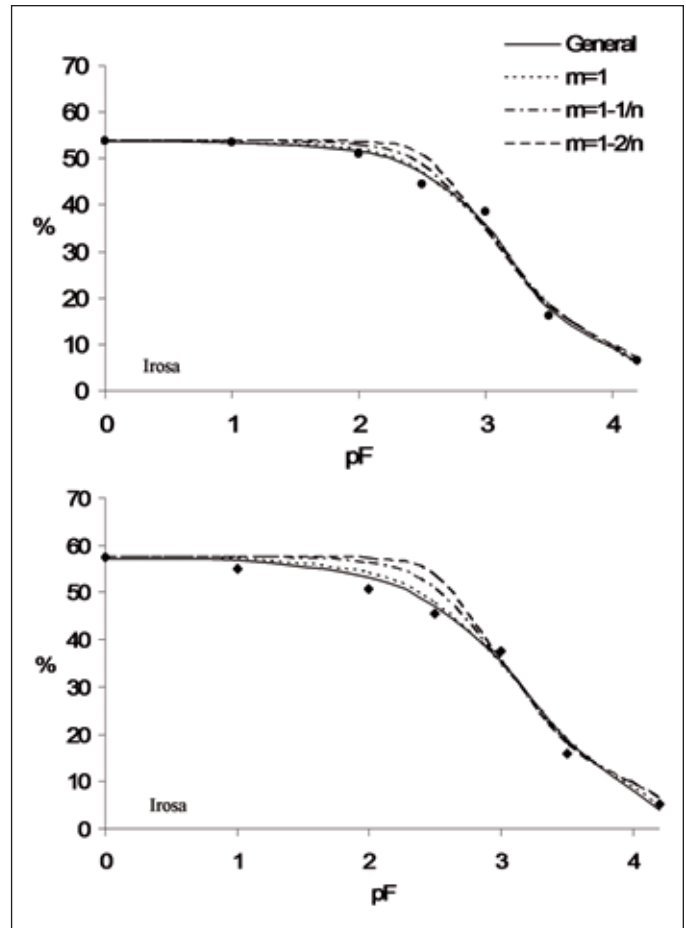


Figura 1. Curvas de retención y ajustes al modelo de Van Genuchten

Figure 1. Moisture retention characteristic curves and fitting to Van Genuchten's general and simplified models

mente retenida como para no ser extraíble por las raíces, pero tampoco está tan libre que pueda drenar antes de que la planta sea capaz de utilizarla. Los valores para ambas muestras están en torno a 45 g de agua por cada 100 g de lodo (tabla 1), un valor similar a los suelos naturales de Galicia y en todo caso superior a lo habitual en otros residuos mineros (Leirós *et al.*, 1995).

Los datos experimentales de la curva de retención se ajustaron usando el modelo de Van Genuchten. En este modelo, la capacidad de retención de agua de un suelo a una presión de succión determinada viene descrita por la ecuación 1 (Van Genuchten, 1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{(1 + (\alpha \cdot s)^n)^m} \quad (1)$$

donde  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua a una

presión de succión ( $s$ ),  $\theta_{sat}$  es la capacidad máxima de retención de agua,  $\theta_r$  es la capacidad de retención de agua residual;  $n$ ,  $m$  y  $\alpha$  son los parámetros que definen la forma de la curva. Los valores de pF se relacionan con la presión de succión mediante la ecuación 2:

$$pF = \log(100s) \tag{2}$$

donde  $s$  se expresa en metros. El parámetro  $\alpha$  se relaciona inversamente con el valor de entrada de aire, es decir, a menor  $\alpha$  mayor extensión de la zona de saturación de la curva, pero no afecta a la forma de la curva. El parámetro  $n$  se relaciona con la distribución de tamaño de poro, y es mayor cuanto más uniforme es ésta; así, cuanto mayor es el valor de  $n$ , mayor es la pendiente de la zona de desaturación. Por último,  $m$  se relaciona con la asimetría de la curva; valores altos de este parámetro se corresponden con una pendiente elevada de la curva en la zona de saturación residual (Sillers *et al.*, 2001).  $\theta_r$ ,  $n$ ,  $m$  y  $\alpha$  se estiman a partir del ajuste de los datos experimentales de la curva a la ecuación 1. Van Genuchten observó que para la mayoría de los suelos este modelo está sobredimensionado, y sugirió la introducción de dos simplificaciones; en la primera de ellas el parámetro  $m$  vendría definido por la relación lineal  $m=1-1/n$ , con lo que la ecuación 1 tomaría la forma siguiente:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot s)^n]^{1-1/n}} \tag{3}$$

y en una segunda aproximación el parámetro  $m$  vendría definido por la relación lineal  $m=1-2/n$ , resultando en la ecuación 4:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot s)^n]^{1-2/n}} \tag{4}$$

Más tarde, Vereecken *et al.* (1989) observaron que asignar un valor de 1 al parámetro  $m$  da mejores ajustes de las curvas que las anteriores aproximaciones, y que las diferencias con el modelo más general son despreciables. En este caso la expresión para la descripción de la curva vendría dada por la ecuación 5:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{1 + (\alpha \cdot s)^n} \tag{5}$$

En este trabajo se han tenido en cuenta todas estas observaciones, ajustándose el modelo general, en el que  $m$  no está definido, y las tres simplificaciones, a los datos experimentales de las curvas de retención. Los resultados de los ajustes se muestran en la tabla 2, y se representan gráficamente en la figura 1.

Observamos, de acuerdo con Vereecken *et al.* (1989), que la aproximación  $m=1$  no da lugar a importantes diferencias con respecto al modelo general. Sin embargo, la introducción de las otras dos simplificaciones empeoró el ajuste de los datos experimentales. Como prueba de esto, el parámetro  $\theta_r$  se hizo siempre menor que cero en el ajuste de estos modelos, lo que físicamente no tiene sentido, y por tanto fue necesario poner restricciones ( $\theta_r \geq 0$ ) para el ajuste, lo que seguramente fue la causa de los peores resultados en estos casos, un hecho que también fue observado por Vereecken *et al.* (1989). Por otro lado, se observó como cada aproximación dio lugar a cambios en los valores de  $\alpha$  y  $n$ , que tuvieron los efectos esperados en la forma de la curva. A medida que los ajustes produjeron valores más altos de  $\alpha$ , la zona de saturación capilar se fue desplazando hasta valores más altos de succión, produciendo en consecuencia un incremento de la pendiente del tramo de desaturación, que se manifestó en valores más altos de  $n$ . Esto tiene como consecuencia un valor cada vez menor de  $m$  que no se corresponde con los datos experimentales, en los que se observa que el tramo de la curva de saturación residual tiene una pendiente elevada, y por tanto los valores de  $m$  deberían ser altos para un buen ajuste, como ocurre en el modelo general (en los que  $m$  vale 3,67 y 3,72).

Se calcularon además, para la descripción de la curva de retención, los valores de la pendiente y el punto de inflexión (en ambos casos para la simplificación  $m=1-1/n$ ). Las expresiones utilizadas son las siguientes (Sillers *et al.*, 2001):

Irosa 1	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$m$	$R^2$
General	1,7	0,010	0,82	3,72	0,987
$m=1$	0	0,06	1,02	1	0,982
$1/n$	0	0,17	1,68	0,40	0,966
$2/n$	0	0,21	2,61	0,23	0,951
Irosa 2	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$m$	$R^2$
General	5,5	0,015	1,04	3,67	0,992
$m=1$	2,2	0,06	1,17	1	0,989
$1/n$	0	0,15	1,67	0,40	0,983
$2/n$	0	0,20	2,60	0,23	0,970

Tabla 2. Parámetros de los ajustes de las curvas de retención de agua

Table 2. Parameters of the fitting of the moisture retention characteristic to Van Genuchten's general and simplified models

$$s = \left[ \frac{n-1}{nm\alpha^n + \alpha^n} \right]^{(1/n)} \tag{6}$$

donde *s* es la succión en metros correspondiente al punto de inflexión, a partir del cual se calculó el valor de *pF* correspondiente. El valor de humedad del punto de inflexión ( $\theta_i$ ) se calculó mediante la expresión descrita en Dexter y Bird (2001):

$$\theta_i = (\theta_{sat} - \theta_r) \cdot \left( 1 + \frac{1}{m} \right)^{-m} + \theta_r \tag{7}$$

La pendiente de la curva en el punto de inflexión viene dada por la ecuación 8:

$$\text{Pendiente} = - \frac{\alpha m (m n + 1)^{(n m + 1/n)} (n - 1)^{(n - 1/n)}}{n^m (m + 1)^{m + 1}} \tag{8}$$

El valor de la pendiente y el punto de inflexión nos indican cual es el tamaño de poro más común, pues nos indican el punto en el que la velocidad de pérdida de humedad es máxima. Los valores obtenidos para estos parámetros se muestran en la tabla 3.

Por otro lado, recientemente se ha dado una nueva interpretación para estos parámetros en relación con el uso del suelo, pues como muestran Dexter y Bird (2001) la humedad correspondiente a este punto podría ser el valor óptimo de humedad para el laboreo. Este es un valor de especial importancia en el caso de materiales como los lodos de pizarra, al indicar el valor de humedad al que se deben realizar las labores de restauración para producir la mínima desestabilización de la estructura, ya de por sí débil. En la tabla 3 vemos que estos valores están muy por debajo de la capacidad de campo en ambos casos, lo que indica dificultades para el manejo.

### Porosidad

La porosidad total de los lodos es considerablemente alta (tabla 1), debido a que en el momento de su recogida no habían sufrido la compactación habitual por el tráfico de maquinaria. La distribución de tamaño de poro puede deducirse experimentalmente a partir de la curva de retención. Para ello, se transformaron los valores de succión en radio equivalente (*r*) del mayor poro lleno de agua, a partir de la ecuación de ascenso capilar (Bear, 1972):

	<i>pF</i>	$\theta_i$ (%)	Pendiente
Irosa 1	2,54	43,8	-0,430
Irosa 2	2,59	41,1	-0,426

Tabla 3. Valores de *pF*, humedad ( $\theta_i$ ) y pendiente del punto de inflexión de las curvas de retención, según el ajuste al modelo de Van Genuchten

Table 3. Suction (*pF*), moisture ( $\theta_i$ ) and slope of the moisture retention characteristic curves at the inflection point

$$r = \frac{2\gamma \cos \beta}{\rho g S} \tag{9}$$

donde  $\gamma$  es la tensión superficial del agua (72,75 mJ m<sup>-1</sup> a 20°C),  $\beta$  es el ángulo de contacto, que se toma como 0°,  $\rho$  es la densidad del agua (0,9982 Mg m<sup>-3</sup> a 20°C), *g* es la aceleración de la gravedad (9,80 m s<sup>-2</sup>), y *S* es la presión en metros, calculada a partir de los valores de *pF* según la relación de la ecuación 2. Así, se representó el porcentaje del volumen de poros con respecto al volumen total frente al radio de poro (Figura 2).

Ambas muestras presentaron una distribución muy similar, siendo los poros mayoritarios los de radios comprendidos entre 1 y 3 μm.

Se realizó también la estimación de la función distribución de tamaño de poro a partir del ajuste de la curva al modelo de Van Genuchten. También en este caso se usó la segunda simplificación del modelo (ecuación 3), en la cual la función distribución de tamaño de poro *f(s)* viene definida por la ecuación 10 (Sillers *et al.*, 2001):

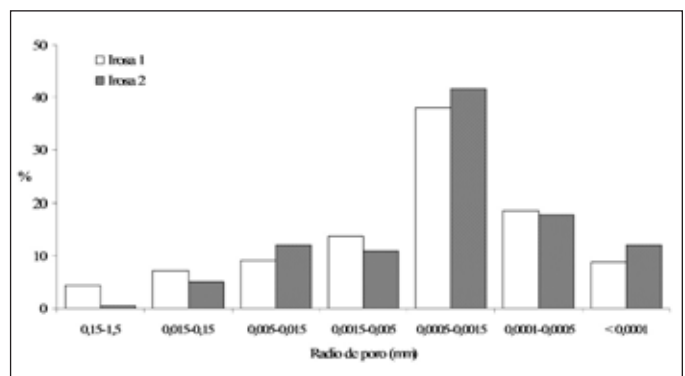


Figura 2. Distribución de tamaño de poro  
Figure 2. Pore size distribution of the slate processing fines

$$f(s) = \frac{mn\alpha(\alpha s)^{n-1}}{[1+(\alpha s)^n]^{m+1}} \quad (10)$$

Los resultados para las dos muestras son muy similares, como se aprecia en la figura 4.

Esta estimación da como resultado una sobreestimación del tamaño medio de poro, como consecuencia del valor obtenido para  $\theta_r$ , que es 0 en los ajustes, de modo que el intervalo mayoritario de tamaño de poro se situó entre 3 y 10  $\mu\text{m}$ , presentando la curva además una forma de tendencia más gaussiana que la experimental. En cualquier caso, destaca la ausencia de macroporosidad de los lodos, que tendrá el efecto negativo de acelerar la evaporación en la superficie de los lodos, haciéndolos más susceptibles a la erosión eólica.

### Conductividad hidráulica

De acuerdo con los valores de conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ; tabla 1) ambas muestras son materiales de permeabilidad baja (O'Neal, 1952). Sin embargo, estos valores no son tan bajos como los de otros residuos similares, como los serrines graníticos, que presentan valores de  $K_s$  dos órdenes inferiores (Delgado y Juncosa, 2005); esto es consecuencia del bajo porcentaje de arcillas en los lodos de pizarra, que incrementarían el grado de impermeabilidad.

El movimiento de fluidos en un suelo o material que no está saturado de agua es difícil de estudiar directamente: la conductividad hidráulica insaturada es muy variable en campo y su determinación resulta costosa y laboriosa. Es por eso que existen múltiples modelos matemáticos para su predicción, en general a partir de la curva de retención, siendo el modelo de Van Genuchten uno de los más usados. En este trabajo la conductividad hidráulica insaturada ( $K_{ins}$ ) se calculó a partir del ajuste de la curva de retención de agua y el valor de  $K_s$ , usando las ecuaciones correspondientes del modelo de Van Genuchten. Estas se basan en las ecuaciones del modelo de Mualem para el cálculo de la conductividad hidráulica insaturada (Van Genuchten, 1980), en el cual:

$$K_r = \theta^{1/2} \left[ \frac{f(\theta)}{f(1)} \right]^2 \quad (11)$$

siendo  $K_r$  la conductividad hidráulica relativa a cada presión, definida por la ecuación:

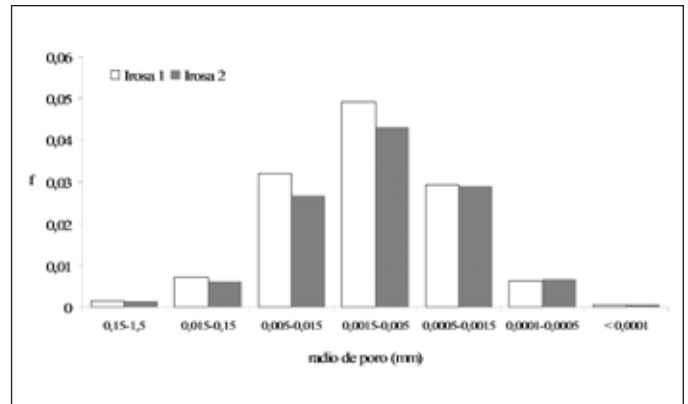


Figura 3. Función distribución de tamaño de poro  
Figure 3. Predicted pore size distribution function of the slate processing fines

$$K_{ins} = K_r \cdot K_s \quad (12)$$

y siendo  $f(\theta)$  y  $f(1)$  las soluciones correspondientes a la siguiente integral:

$$f(\theta) = \int_0^\theta \left[ \frac{x^{1/m}}{1-x^{1/m}} \right]^{1/n} dx \quad (13)$$

Cuando  $m$  no está definido (en el modelo general, ecuación 1), esta integral no tiene solución en forma simple, y con los datos de este ajuste no se puede realizar la predicción de la conductividad. Cuando  $m$  toma el valor 1 la solución de la integral (ecuación 11) es la siguiente:

$$f(\theta) = -\theta - \log(1-\theta) \quad (14)$$

en este caso, el valor de  $K_r$  no se puede calcular, porque  $f(1)$  contiene un valor indeterminado (logaritmo de cero). Por tanto, tampoco con el ajuste a este modelo se calcularon los valores de la conductividad hidráulica insaturada. Cuando  $m$  viene definido por la relación  $m=1-1/n$ , la integral puede ser resuelta obteniéndose la siguiente solución (Van Genuchten, 1980):

$$f(\theta) = 1 - (1-\theta^{1/m})^m \quad (15)$$

y la expresión para  $K_r$  quedaría como sigue:

$$K_r = \frac{\left[ (1 - (\alpha \cdot s)^{n-1}) \cdot (1 + (\alpha \cdot s)^n)^{-m} \right]^2}{(1 + (\alpha \cdot s)^n)^{m/2}} \quad (16)$$

Cuando se asume la relación  $m=1-2/n$ , la expresión para el cálculo de la conductividad hidráulica insaturada se basa en el modelo de Burdine y tiene la siguiente forma (Van Genuchten, 1980):

$$K_r = \frac{1 - (\alpha \cdot s)^{n-2} \cdot (1 + (\alpha \cdot s)^n)^{-m}}{(1 + (\alpha \cdot s)^n)^{2m}} \quad (17)$$

siempre y cuando  $n$  sea mayor de 2, y  $m$  esté entre 0 y 1. Las ecuaciones 16 y 17 se usaron para la predicción de la conductividad hidráulica insaturada de los lodos, sustituyendo los parámetros  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$  del ajuste correspondiente, a diversos valores de succión, para construir la curva conductividad/presión (figura 2).

Solo se muestran los ajustes para la muestra Irosa 2, porque las predicciones para la muestra Irosa 1 dieron errores a valores altos de succión. La predicción para  $K_{ins}$  coincide con lo esperado: como consecuencia de la ausencia de macroporos,  $K_{ins}$  se mantiene prácticamente constante hasta valores de presión próximos a la capacidad de campo (pF 2). El descenso brusco de la conductividad una vez se vacían los poros mayores se debe tanto a un descenso del número de poros ocupados por agua como a un incremento de la tortuosidad.

## Conclusiones

Los lodos de serrado de pizarra presentan inicialmente propiedades físicas compatibles con el desarrollo de las plantas, por lo que podrían ser utilizados en las superficies de escombreras como material para la revegetación. El agua disponible para las plantas, definida como la diferencia en el agua retenida a pF 2 y a pF 4,2, es mayor que la de otros residuos mineros y semejante a la de los suelos naturales, como consecuencia de su elevado contenido en finos. Como corresponde a su homogeneidad textural, la mayoría de los poros se encuentran en un intervalo limitado de tamaños, correspondiente a una fracción de microporos de radio en torno a 3  $\mu\text{m}$ . La conductividad hidráulica es baja, pero se mantiene sin grandes cambios desde la saturación hasta valores de pF 2, a partir de los cuales desciende bruscamente como consecuencia del vaciado de los microporos. Sin embargo, los lodos no son un material impermeable,

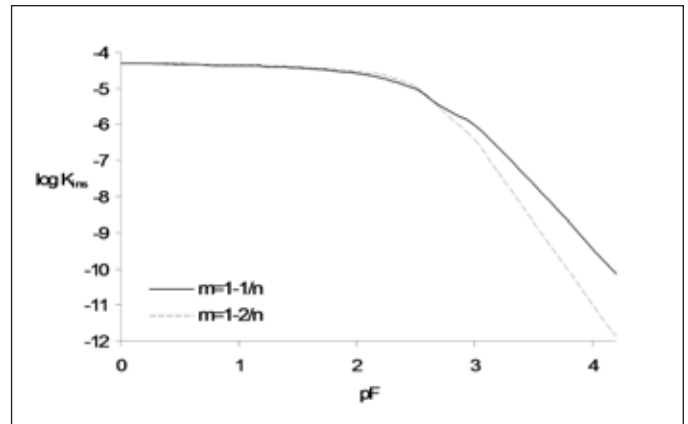


Figura 4. Predicción de la conductividad hidráulica insaturada para Irosa 2

Figure 4. Unsaturated hydraulic conductivity for the sample Irosa 2 as predicted by the Van Genuchten's model

y permiten la circulación de agua verticalmente, lo que sugiere la atenuación de los procesos de erosión y escorrentía superficial.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Víctor Cárdenes y a la empresa IROSA la cesión de las muestras de lodos.

## Referencias

- Álvarez, A., Teijeiro, T., Mezquita, F., Gil, F., Seoane, S., Leirós, M.C. y Trasar, M.C. 2000. *Estudio de viabilidad de los lodos de pizarra y su aprovechamiento como elemento de restauración*. Calfensa Medioambiente, Santiago.
- Barral, M.T., Silva, B., García-Rodeja, E. and Vázquez, N. 2005. Reutilization of granite powder as an amendment and fertilizer for acid soils. *Chemosphere*, 61, 993-1002.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York.
- Benito Rueda, M.E. 1988. *Iniciación al estudio de la estructura de los suelos de Galicia y de sus procesos de degradación*. Tesis Doctoral, Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.
- Delgado, J. y Juncosa, R. 2005. Estudio de los residuos de corte de granito ("serrines") en relación con sus características como residuo, su potencial contaminante y aplicaciones prácticas en ingeniería civil. *Revista da Real Academia Galega das Ciencias*, XXIV, 73-258.
- Dexter, A.R. and Bird, N.R.A. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research*, 57, 203-212.

- Dollhopf, D.J. and Postle, R.C. 1988. Physical parameters that influence successful minesoil reclamation. En: Hossner, L.R. (ed.), *Reclamation of surface-mined lands. Volume I*. CRC Press, Boca Raton, 81-104.
- Fraser, J. and McBride, R.A. 2000. The utility of aggregate processing fines in the rehabilitation of dolomite quarries. *Land Degradation and Development*, 11, 1-17.
- Gutián, F. y Carballas, T. 1976. *Técnicas de análisis de suelos*. Editorial Pico Sacro, Santiago de Compostela.
- Klute, A. and Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. En: Klute, A. (ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America, Madison, 687-734
- Leirós, M.C., Varela, C., Gil Sotres, F., Trasar-Cepeda, C. y Seoane, S. 1995. Los suelos de la mina. En: Gutián Ojea, F. (ed.), *Recuperación de las escombreras de la mina de lignitos de Meirama (A Coruña)*. Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 125-157.
- Lombardero, M. y Quereda, J.M. 1992. La piedra natural para la construcción. En: García Guinea, J. y Martínez Frías, J. (eds.), *Recursos minerales de España*. CSIC, Madrid, 1115-1150.
- O'Neal, A.M. 1952. A key for evaluating soil permeability by means of certain field clues. *Soil Science Society of America Proceedings*, 16, 312-316.
- Paradelo, R., Cendón, Y., Moldes, A.B. and Barral, M.T. 2007. A pot experiment with slate processing fines and compost. *Geoderma*, 141, 363-369.
- Paradelo, R., Moldes, A.B. and Barral, M.T. 2008. Characterization of slate processing fines according to parameters of relevance for mine spoil reclamation. *Applied Clay Science*, 41, 172-180.
- Paradelo, R., Moldes, A.B. and Barral, M.T. 2009. Properties of slate mining wastes incubated with grape marc compost under laboratory conditions. *Waste Management*, 29, 579-584.
- Reeve, M.J. and Carter, A.D. 1991. Water release characteristic. En: Smith, K.A. and Mullins, C.E. (eds.), *Soil analysis. Physical methods*. Marcel Dekker, New York, 111-160.
- Rowe, E.C., Williamson, J.C., Jones, D.L., Holliman, P. and Healey, J.R. 2005. Initial tree establishment on blocky quarry waste ameliorated with hydrogel or slate processing fines. *Journal of Environmental Quality*, 34, 994-1003.
- San Roman, J.M. 2000. *La industria de la pizarra y las transformaciones espaciales*. Instituto de Estudios Valdeorreses. Ourense.
- Sillers, W.S., Fredlund, D.G. and Zakerzadeh, N. 2001. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19, 243-283.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. and Darius, P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, 148, 389-403.

Recibido: abril 2009

Revisado: julio 2009

Aceptado: julio 2009

Publicado: julio 2009