

## POSIBILIDADES DE LAS BARRERAS CAPILARES PARA REDUCIR EL RIESGO DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS: EL CASO DEL RÍO GUADIAMAR (SEVILLA)

Giráldez, J.V.<sup>1,2</sup>, Laguna, A.M.<sup>3</sup> y Jiménez-Hornero, F.J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Agronomía. Universidad de Córdoba, Apdo. 3048, 14080 Córdoba; aglgicej@uco.es

<sup>2</sup> Dpto. de Mejora y Agronomía, IAS, CSIC, Apdo. 4084, 14080 Córdoba.

<sup>3</sup> Dpto. de Física Aplicada Universidad de Córdoba, Apdo. 3048, 14080 Córdoba

**RESUMEN.** La adición de una capa de material fino sobre la superficie de un suelo contaminado reduce el riesgo de desplazamiento de solutos por el agua que percola, al tiempo que permite el restablecimiento de una cubierta vegetal protectora.

El diseño de estas barreras, conocidas como barreras capilares, se basa en la geometría del medio poroso a distintas escalas: desde la microscópica, que regula la retención y transmisión del agua, hasta la macroscópica que canaliza el flujo con distinta velocidad según la inclinación de la interfaz entre ambas capas, barrera y suelo.

La longitud más conveniente de la barrera, longitud de desviación capilar, depende del ángulo de inclinación de la interfaz, los cocientes entre las conductividades hidráulicas saturadas y la intensidad de percolación, y la diferencia entre los componentes matriciales del potencial del agua en el suelo y la barrera en el estado de entrada del aire. En el caso de interfaces curvadas más eficaces, como el cilindro parabólico, la eficiencia de la barrera pasa de valores positivos a negativos a medida que la razón de conductividades hidráulicas entre ambas capas tiende a igualarse.

Se analizan las posibilidades de las barreras capilares en la protección de zonas contaminadas en el valle del río Guadamar.

**ABSTRACT.** The addition of a fine-textured layer to the surface of coarse-textured contaminated soil prevents solute displacement by percolating water, and allows the establishment of a protective vegetative cover.

The design of this barrier, known as capillary barrier, is based on the geometry of the porous medium at different scales: from the microscopic scale that controls the retention and transmission of water to the macroscopic scale that imposes boundary conditions for the water flow in the barrier.

The optimum length of the barrier (the capillary diversion length) depends on the interface angle, the soil-barrier hydraulic conductivity ratio, the water infiltration rate, and the difference between the water potentials at the air-entry states of the two layers. Curved interfaces are more efficient in diverting water. For a parabolic cylinder

the water shedding efficiency decreases from unity to negative values as the hydraulic conductivity of the barrier approaches that of the soil.

The possibilities of a capillary barrier for the protection of contaminated at the river Guadamar valley are analysed.

---

### 1. Introducción

A consecuencia de la rotura de las balsas de lodos de la mina de Aznalcóllar el 25 de abril de 1988, se contaminó una notable superficie del valle del Río Guadamar. Tras las operaciones posteriores de limpieza quedaron aún algunas zonas con un contenido elevado de metales pesados como Zn y Mn, y unos valores de pH próximos a 4. Aunque su reducida extensión no representaría un gran problema, el carácter arenoso del suelo, con poros grandes por los que circula el agua con gran velocidad en el estado saturado, y su proximidad al cauce del río, podría acelerar la descarga de los contaminantes en los acuíferos someros, (e.g. Ordóñez et al. en este simposio) lo que implica un riesgo mayor.

Ante la escasa viabilidad de otra operación de limpieza, que en otra etapa hubiese sido muy sencilla de ejecutar por la pequeña extensión y profundidad de la zona afectada, una de las posibles alternativas es la cobertura de la misma con una capa de suelo con poros de menor tamaño, para que actúe a modo de barrera capilar algo similar a lo que propusieron, entre otros autores, Nyhan et al. (1990). Nyhan et al. (1990) comprobaron que un suelo de gran espesor, 0.71 m, reduce el volumen de agua lixiviado en condiciones naturales sobre el que se produce en un suelo de un espesor mucho menor, 0.2 m, lo que, a pesar de su obviedad, indica el papel de horizontes de suelo cubriendo restos a los que no se desea llegue el agua. En un ensayo posterior Fayer et al. (1992) redujeron el espesor de la barrera protectora, como ellos la denominaban, a una franja de 0.1 m bajo un suelo franco limoso de 1.5 m de espesor, comprobando la eficacia de la barrera anulando el descenso del agua hacia la capa subyacente de grava gruesa. Ross (1990) propuso el término barrera capilar para designar a

una capa de suelo con poros finos dispuesta sobre un suelo de textura más gruesa con el fin de desviar el agua que se infiltra de modo que no llegue al suelo original, o lo haga con un potencial muy bajo, con poca densidad de flujo. En el mismo trabajo definió formalmente sus funciones, iniciando así una secuencia de contribuciones que constituyen la base teórica de este método de protección de suelos contaminados.

El objetivo de este trabajo es analizar las posibilidades de las barreras capilares para la protección de suelos contaminados por diferentes causas, más allá del vertido de lodos de Aznalcóllar.

## 2. Propiedades de las barreras capilares

Como Ross (1990) reconoce una barrera capilar eficaz ha de proveer una vía de evacuación lateral del agua que pasa por ella, lo que se favorece dándole una inclinación con respecto a la horizontal. Se trata de un medio estratificado formado por dos horizontes delimitados por planos inclinados, el de poros más finos en superficie, en los que se supone que la única influencia es la del flujo de infiltración del agua.

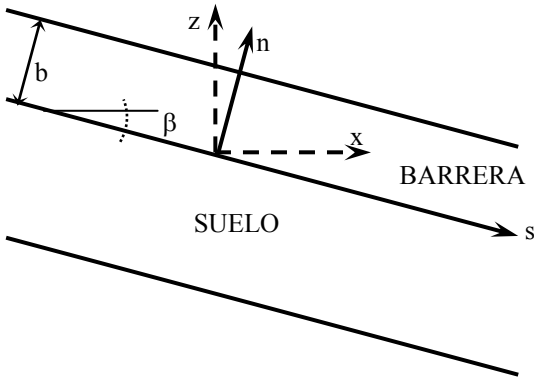


Fig. 1. Geometría de una barrera capilar plana.

Considerando que el medio está bajo régimen permanente y que los horizontes son lo suficientemente profundos para que se alcance un gradiente hidráulico unitario a distancia de la interfaz, si la intensidad de la infiltración de agua es  $r$ ,  $[LT^{-1}]$ , las componentes matriciales del potencial en la barrera  $\psi_{ba}$ , y en el suelo,  $\psi_{su}$ ,  $[L]$ , se ajustan a ella,  $k_{ba}(\psi_{ba})=r$ , y  $k_{su}(\psi_{su})=r$ , siendo  $k_{ba}$  y  $k_{su}$  las conductividades hidráulicas respectivas.

En estas condiciones los flujos en la dirección normal y paralela a la interfaz son,  $J_n$ ,  $J_s$ , (e.g. Zaslavsky y Sinai, 1981; Miyazaki, 1993, pp. 133-136; Warrick, 2003, pp. 278-279),

$$\begin{aligned} J_n &= -k_{ba}(\psi) \left[ \frac{d\psi}{dn} + \cos \beta \right] \\ J_s &= -k_{ba}(\psi) \left[ \frac{d\psi}{dn} - \sin \beta \right] \end{aligned} \quad (1)$$

en la que  $n$  es la coordenada normal a la interfaz,  $s$  la paralela a ella, y  $\beta$  es el ángulo que forma con el horizonte. El flujo horizontal de agua es  $Q_h$ ,  $[L^2T^{-1}]$ ,

$$Q_h = -\tan \beta \int_{\psi_1}^{\psi_2} k_{ba}(\psi) d\psi \quad (2)$$

en la que la relación entre la conductividad hidráulica y la componente matricial del potencial puede ser descrita con cualquier expresión, como la relación exponencial de Gardner (1958),

$$k = k_{sat} \exp(\alpha \psi) \quad (3)$$

siendo  $k_{sat}$  el valor de la conductividad hidráulica en el estado de saturación y  $\alpha$  un parámetro relacionado con el tamaño de los poros del suelo,  $[L^{-1}]$ , denominado *número sorptivo* por Warrick et al. (1997). Usando esta expresión, y considerando la presencia de una región casi saturada bajo succión en la curva de retención de agua, como recomendaban Steenhuis et al. (1991), se obtiene la *longitud de desviación capilar*,  $L_{dc}$ , que es la necesaria para evacuar lateralmente el agua recibida por la barrera.

$$L_{dc} \leq \tan \beta \left[ \alpha^{-1} \left( \frac{k_{s,ba}}{r} - 1 \right) + \frac{k_{s,ba}}{r} (\psi_{ba,ea} - \psi_{su,ea}) \right] \quad (4)$$

en la que  $k_{s,ba}$  y  $k_{s,su}$  son los valores de conductividad hidráulica saturada de la barrera y  $\psi_{su,ea}$  y  $\psi_{ba,ea}$  las componentes matriciales del potencial del agua en el estado de entrada del aire, respectivamente para el suelo y la barrera. Esta expresión se reduce a,

$$L_{dc} \leq \frac{k_{s,ba}}{r} \tan \beta \left[ \alpha^{-1} + (\psi_{ba,ea} - \psi_{su,ea}) \right] \quad (5)$$

cuando el valor de la intensidad de infiltración,  $r$ , es mucho menor que la conductividad hidráulica saturada de la barrera,  $k_{s,ba}$ . La influencia de la diferencia entre los valores de la componente matricial del potencial en el estado de entrada del aire no es trivial.

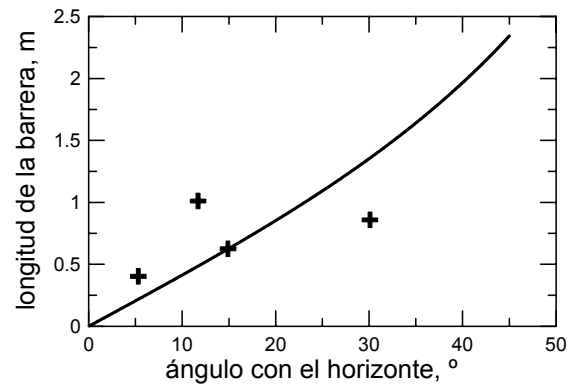


Fig. 2. Variación de la longitud de la barrera capilar con la pendiente según la Ec. (4), línea continua, y datos experimentales de Miyazaki (1993).

En la Fig. 2, muestra la eficacia de la ecuación (4) para predecir la longitud de una barrera usando los datos de un ensayo experimental en laboratorio de Miyazaki (1993, pp. 118-119). En este ensayo se delimitó la longitud máxima de la barrera como aquella en donde no llegaban a formarse discontinuidades como dedos o penachos de infiltración al variar su inclinación. Para los datos de la Fig. 2 el valor numérico del primer término en la parte entre corchetes de la Ec. (4) es la quinta parte del segundo.

Como en la preparación de la barrera se compactan sus horizontes, la conductividad hidráulica saturada en dirección paralela a la interfaz suele ser muy superior a la de la dirección normal. Por ello es conveniente incluir sus efectos en la expresión (4), como propuso Stormont (1995), convirtiéndola en

$$L \leq \frac{k_{sat,bs} \tan \beta}{r \alpha_{ba}} \left[ \left( \frac{r}{k_{sat,su}} \right)^{\alpha_{ba}} - \frac{r \cos \xi}{k_{sat,bn} \cos \phi} \right] + b \left( \frac{k_{sat,bs} - k_{sat,bn}}{k_{sat,bn}} \right) \tan \phi \sin \beta \quad (6)$$

En la Ec. (6) las conductividades hidráulicas saturadas de la barrera en la dirección normal y paralela a la interfaz son respectivamente  $k_{sat,bn}$  y  $k_{sat,bs}$ ,  $b$  es el espesor de la barrera y  $\xi$  el ángulo de incidencia del flujo exterior del agua con respecto a la normal de la barrera obtenido a partir de la elipse de conductividades. A medida que aumenta el cociente entre las conductividades hidráulicas saturadas en las direcciones paralela y normal a la interfaz, mayor es también la longitud de desviación de la barrera, de forma casi proporcional a dicho cociente.

### 3. Barreras capilares curvadas

En un sencillo esquema Selker (1997) demostró las ventajas de una forma parabólica de la barrera que duplicaba su eficiencia con respecto a la forma plana, al aumentar la pendiente de la misma. El trabajo de Selker motivó a John Philip quien extendió en 1998 su estudio del flujo en regiones de los medios porosos en los que no circula el agua, regiones de *exclusión de la percolación* (e.g. Philip et al. 1989a; Philip et al. 1989b), a medios estratificados como el conjunto de barrera capilar y suelo en superficies parabólicas en dos y tres dimensiones: cilindros de sección transversal parabólica, o cilindros parabólicos o paraboloides.

Aunque no sea posible lograr una forma parabólica precisa en la confección de una barrera, Selker (1997) sugirió su aproximación mediante porciones planas con pendiente creciente. Por ello el diseño parabólico sería recomendable para casos como el de los rodales del meandro del río Guadiamar.

En su análisis Philip adoptó la expresión exponencial de Gardner y el potencial de Kirchhoff, o potencial del flujo matricial (Raats y Gardner, 1971),  $\Theta$ ,

$$\Theta = \int_{-\infty}^{\psi} k d\psi \quad (7)$$

así como coordenadas parabólicas,  $\zeta$  y  $\eta$  relacionadas con las cartesianas  $x$  y  $z$  mediante las ecuaciones

$$x = \zeta \eta \quad z = (\zeta^2 - \eta^2)/2 \quad (8)$$

en la que la parábola definida por  $\eta = 1$  representa la interfaz de la barrera  $z = (x^2 - l^2)/(2l)$  siendo por tanto  $l/2$  la distancia del extremo superior de la misma a la superficie.

La ecuación del movimiento del agua es

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \eta^2} = 2s \left( \zeta \frac{\partial \vartheta}{\partial \zeta} - \eta \frac{\partial \vartheta}{\partial \eta} \right) \quad (9)$$

en la que  $s = cl/2$  es un parámetro y  $\vartheta$  es el potencial de Kirchhoff normalizado. En las soluciones analíticas de la ecuación (9) se usan tres parámetros: los potenciales en la interfaz,  $\vartheta_i$ , y en una región suficientemente alejada de la barrera en la que la densidad de flujo vertical es uniforme,  $\vartheta_{\infty}$ , en condiciones normales, o críticas,  $\vartheta_{\infty+}$ , cuando  $\vartheta_i = 1$ .

Philip distinguió en el medio poroso los regímenes *subcríticos*, en donde el agua no llega a entrar nunca en el suelo o la cavidad, y por tanto el potencial no llega al valor de saturación,  $\vartheta < \vartheta_0$ , y *super-críticos* en los que  $\vartheta > \vartheta_0$  o, lo que es físicamente posible, la conductividad hidráulica es superior a la que correspondería al estado de entrada de agua del medio, penetrando en el suelo y en la cavidad, atravesando el perímetro inferior de la barrera. Cuando bajo la barrera no hay suelo, como es el caso de cavidades desde macroporos huecos hasta túneles, Philip (1998) denominó a la barrera *maximal*, y en el caso contrario, con suelo, barrera *submaximal*.

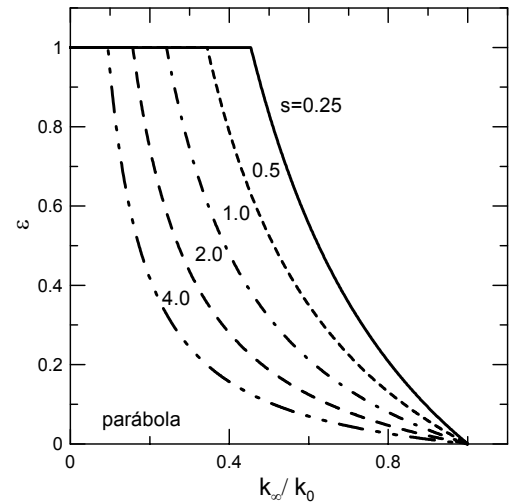


Fig. 3. Eficiencia de desviación de agua en una barrera capilar parabólica maximal en función de la velocidad de percolación,  $k_{\infty}/k_0$ , para diferentes valores del parámetro geométrico según Philip (1998)

En el caso de una barrera submaximal la eficiencia de desviación de agua, que es la fracción del flujo de agua que no llega al suelo,  $\varepsilon$ ,

$$\varepsilon = 1 - k_0 v_i / k_\infty = 1 - v_i / \mathcal{G}_\infty \quad (10)$$

en donde  $k_0$  y  $k_\infty$  son las conductividades hidráulicas del suelo en saturación y a gran distancia de la cavidad, siendo  $v_i$  la velocidad del agua a través de la interfaz de la barrera. La Fig. 3 muestra cómo esta eficiencia depende de la razón entre ambas conductividades y del parámetro  $s$ .

El caso de barreras capilares parabólicas submaximales, con suelo en la cavidad, es similar al de las barreras maximales pero con un potencial de agua  $\psi_i < 0$  en la interfaz. La razón entre las conductividades hidráulicas saturadas de la barrera y el suelo es  $k_{sat,ba}/k_{sat,su} = \lambda^2$ , de acuerdo con la teoría de la semejanza de Miller y Miller, (Sposito y Jury, 1985). Con las hipótesis adoptadas, en cuanto el potencial en la interfaz sea mayor que el que iguala los valores de las conductividades hidráulicas del suelo y de la barrera se producirá una *concentración*, en vez de la *desviación* considerada hasta ahora. Esto implica que la densidad del flujo de agua aumentará en el suelo, con el consecuente desplazamiento de solutos. Por ello la eficiencia se reduce y puede llegar a ser negativa. La Fig. 4 muestra la variación de esta eficiencia con la velocidad de percolación.

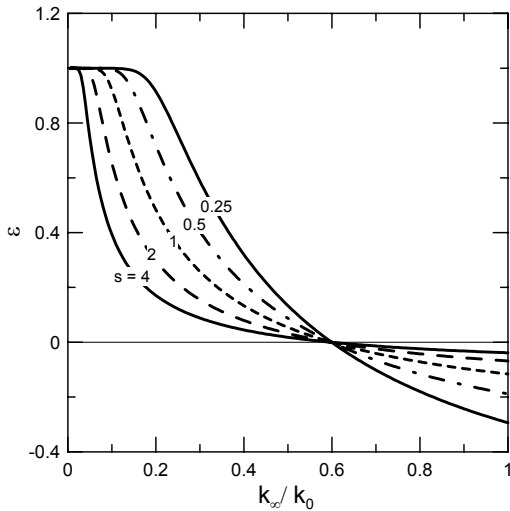


Fig. 4. Eficiencia de desviación de agua en una barrera capilar parabólica submaximal en función de la velocidad de percolación,  $k_d/k_0$ , para diferentes valores del parámetro geométrico y la longitud característica de poro  $\lambda = 10$  según Philip (1998)

En esta figura se observa como la eficiencia es negativa, caso de concentración de flujos, cuando las conductividades hidráulicas en saturación y a distancia de la barrera son próximas.

La función de corriente se calcula con

$$\Phi = x \left\{ 1 - \frac{1 - \mathcal{G}_\infty}{\mathcal{G}_\infty \operatorname{erfc}(s^{1/2})} \left[ \frac{e^{-s\eta^2}}{\eta(\pi s)^{1/2}} - \operatorname{erfc}(s^{1/2}\eta) \right] \right\} \quad (11)$$

para barreras maximales y

$$\Phi = x - \frac{(\mathcal{G}_i - \mathcal{G}_\infty)\zeta}{\mathcal{G}_\infty \operatorname{erfc}(s^{1/2})} \left[ \frac{e^{-s\eta^2}}{(\pi s)^{1/2}} - \eta \operatorname{erfc}(s^{1/2}\eta) \right] \quad (12)$$

para barreras submaximales. Con estas ecuaciones se han trazado algunas líneas de corriente como las que se muestran en la Fig. 5.

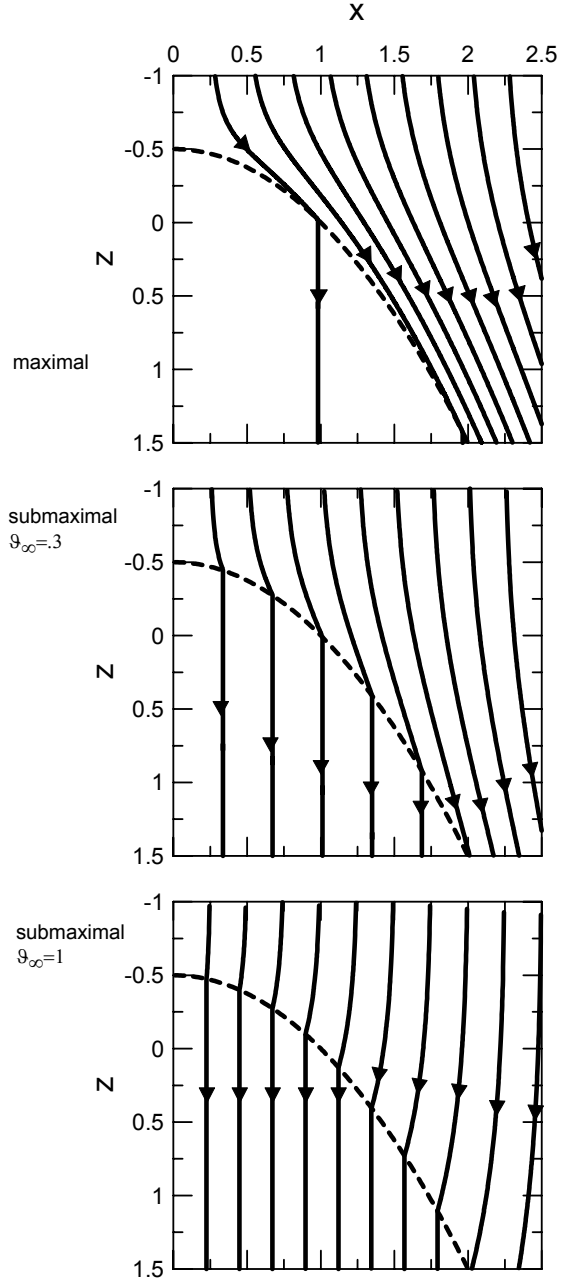


Fig. 5. Líneas de corriente en la percolación del agua a través de una barrera capilar y una cavidad superior, maximal, o un suelo, media e inferior, submaximales con los valores de la velocidad de percolación normalizada,  $\mathcal{G}_\infty$ , que se indica al margen. Los valores de la función de corriente crecen regularmente a intervalos de 0.25 desde el eje de ordenadas, valor nulo, hacia la derecha. Los parámetros son  $\lambda = 10$  y  $s = 1$ , según Philip (1998).

En estas figuras se aprecia el embocamiento o canalización del flujo, *funneling* en la versión inglesa,

producido por la presencia de la barrera observada por Miyazaki (e.g. 1993, pp. 103-116). El ensanchamiento de los tubos de corriente al penetrar en el suelo tras cruzar la interfaz reduce la oportunidad de desplazamiento de los solutos. Sin embargo, en presencia de suelo el efecto es menor, y disminuye más aún a medida que la densidad de flujo vertical lejos de la barrera aumenta. Hay un valor crítico de la conductividad para el que se inicia el efecto de concentración del flujo, como se aprecia en la eficiencia cero de la Fig. 4, y que se correspondería con líneas de corriente verticales como una etapa intermedia en la secuencia de la Fig. 5. Por encima de este valor crítico la concentración de flujos por la barrera se hace más patente.

Por la importancia de la razón entre las conductividades hidráulicas saturadas del suelo y de la barrera,  $\lambda^2$ , se ha representado en la Fig. 6 cómo varía la velocidad de percolación en la que la eficiencia es nula, que se denomina aquí *velocidad de percolación crítica*, con el parámetro de semejanza  $\lambda$ . Este valor indica que las características de transmisión de agua de la barrera han de ser bastante diferentes de la del suelo que ha de proteger.

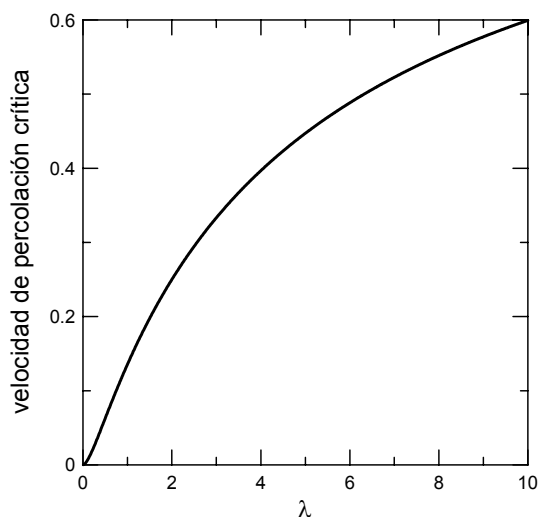


Fig. 6. Velocidad de percolación crítica, correspondiente a una eficiencia de desviación nula en función del parámetro de semejanza capilar  $\lambda$ .

#### 4. Aplicación a los suelos contaminados del río Guadamar

Entre los suelos analizados en el meandro del río Guadamar por Ordóñez et al. (en este simposio) se ha seleccionado como contaminado el denominado 109 y como posible material de barrera otra muestra, 36, cuyas características relevantes se muestran en la Tabla 1. Se han usado unas funciones de edafo-transferencia (Haverkamp et al. 2002) para estimar las propiedades de transmisión de agua.

Tabla 1. Características de los suelos considerados.

suelo	m.o.	pH	arena	limo	$k_{sat}$	$-\psi_{ei}$	$\theta_{sat}$
	%				cm/h	cm	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
109	0.81	3.57	.704	.093	5.0	11	.42
36	2.00	6.62	.313	.193	0.6	25	.50

Con estos datos el valor del parámetro de semejanza de Miller y Miller es  $\lambda \approx 2.9$  lo que limita su aplicabilidad como material de barrera. La velocidad de percolación crítica en este caso es  $\mathcal{G}_\infty = 0.325$ , que no es muy elevada. Cabe pensar que las operaciones preparatorias al compactar reduzcan la porosidad y la capacidad de transmisión de agua por lo que aumentará el valor del parámetro  $\lambda$ , y con él, el intervalo de la velocidad de percolación con eficiencia positiva. Philip limitaba la extensión lateral a una parábola truncada por una línea que pasando por el punto más elevado forma un ángulo de 30° con la horizontal, lo que da una distancia horizontal normalizada de  $2/3^{1/2}$ , que es limitado. Se podría incluir una capa de material más grueso a modo de filtro que acercase las condiciones del medio a las maximales. Algo parecido han sugerido para barreras planas Stormont y Morris (1997). Sin embargo las características de la zona, en la que es razonable esperar una recarga anual de unos 100 mm/año, lo que equivale a un valor de  $k_\infty = 3.2 \cdot 10^{-9}$  m/s, y con un valor de la conductividad hidráulica saturada del suelo  $k_0 = 6.8 \cdot 10^{-7}$  m/s, el valor de la velocidad de percolación normalizada puede ser  $\mathcal{G}_\infty = 0.0047$  que cae dentro de la máxima eficacia de la barrera.

Para conocer con mayor detalle el comportamiento de la barrera, incluyendo el estudio de flujos multifásicos y asociados con el calor, en condiciones transitorias es necesario recurrir a modelos numéricos como propusieron Oldenburg y Pruess (1993).

#### 5. Conclusiones

Una revisión de los fundamentos del flujo en medios estratificados permite establecer las condiciones de funcionamiento de una capa protectora de suelo, barrera capilar, aplicable a suelos como los que hay en la vega del río Guadamar.

*Agradecimientos.* Los autores agradecen las sugerencias de la Dra. Rafaela Ordóñez sobre los suelos de la zona. Asimismo agradecen la financiación de los proyectos PIA-03-050 del IFAP y CAO01-001-C4-01 del IFAPA de la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía. F.J. Jiménez-Hornero está contratado con cargo a las Ayudas para facilitar el Retorno de Investigadores a Centros de Investigación y Universidades de Andalucía (Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa, Junta de Andalucía)

#### Referencias

- Fayer, M.J., Rockhold, M.L., y Campbell, M.D., 1992. Hydrologic modeling of protective barriers: comparison of field data and simulation results, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:690-700.
- Gardner, W.R., 1958, Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table, *Soil Sci.* 85:228-232.
- Haverkamp, R., Reggiani, P., y Nimmo, J.R., 2002, Property transfer models, en Dane, J.H. y Topp, G.C. eds. *Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods.* Soil Sci. Soc. Am. Book Series no. 5, Soil Science Society of America, Madison.
- Miyazaki, T., 1993, *Water flow in soils*, Marcel Dekker, Nueva York.

- Nyhan, J.W., Hakonson, T.E., y Drennon, B.J., 1990, A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions, *J. Environ. Qual.* 19: 281-288.
- Oldenburg, C.M. y Pruess, K., 1993, On numerical modeling of capillary barriers, *Water Resour. Res.* 29:1405-1456.
- Ordóñez R., Kheraiwish, D., Polo M.J., Giráldez, J.V. y González, P., 2005, Influencia del encalado sobre la movilidad de metales en un suelo contaminado en el valle del río Guadamar (Sevilla), este Simposio.
- Philip, J.R., 1998, Seepage shedding by parabolic capillary barriers and cavities, *Water Resour. Res.* 34:2827-2835.
- Philip, J.R., Knight, J.H. y Waetche, R.T., 1989a, Unsaturated seepage and subterranean holes: conspectus, and exclusion problem for circular cylindrical cavities, *Water Resour. Res.* 25:16-28.
- Philip, J.R., Knight, J.H. y Waetche, R.T., 1989b, The seepage exclusion problem for parabolic and paraboloidal cavities, *Water Resour. Res.* 25:605-618.
- Ross, B., 1990, The diversion capacity of capillary barriers, *Water Resour. Res.* 26:2625-2629.
- Ross, B., 1991, Reply, *Water Resour. Res.* 27:2157.
- Raats, P.A.C. y Gardner, W.R., 1971. A comparison of some empirical relationships between pressure head and hydraulic conductivity, and some observations of radially symmetric flow, *Water Resour. Res.* 7:921-928.
- Selker, J., 1997, Design of interface shape for protective capillary barriers, *Water Resour. Res.* 33:259-260.
- Sposito, G. y Jury, W.A., 1985, Inspectional analysis in the theory of water flow through unsaturated soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:791-798.
- Stormont, J.C., 1995, The effect of constant anisotropy on capillary barrier performance, *Water Resour. Res.* 31:783-785.
- Stormont, J.C. y Morris, C.E., 1997, Unsaturated drainage layers for diversion of infiltrating water, *J. Irrig. Drain. Engng.* 123:364-366.
- Steenhuis, T.S., Parlange, J.-Y., y Kung, K.-J. S., Comments on "The diversion capacity of capillary barriers" y B. Ross, *Water Resour. Res.* 27:2155-2156.
- Warrick, A.W., 2003, *Soil Water Dynamics*, Oxford Uni. Press, Oxford.
- Warrick, A.W., Wierenga, P.J. y Pan, L., 1997, Downward water flow through sloping layers in the vadose zone: analytical solutions for diversions, *J. Hydrol.* 192:321-337.
- Zaslavsky, D. y Sinai, G., 1981, Surface hydrology: I-V, *J. Hydr. Div.* 107:1-93.