

## GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA EN LOS SUELOS HIDRÓFOBOS DE LA ZONA DUNAR DEL SO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

F.J. Moral<sup>1</sup>, A. Laguna<sup>2</sup> y J.V. Giráldez,<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Expresión Gráfica, Universidad de Extremadura, Badajoz

<sup>2</sup> Dpto. de Física Aplicada, y

<sup>3</sup> Dpto. de Agronomía, ETSIAM, Univ. De Córdoba, Apdo. 3048, 14080 Córdoba

**RESUMEN.** La presencia de compuestos hidrofóbicos en la superficie de los granos de arena en los suelos de la zona costera del SO de la Península dificulta la infiltración del agua, generándose escorrentía. Aunque las circunstancias hidrológicas no son las más propicias, pues son superficies con escasa pendiente y suelos con grandes poros, existen numerosas pruebas de un flujo superficial activo. Se han efectuado unos ensayos de generación de escorrentía en campo con simulador de lluvia, que han permitido estimar unos parámetros de transmisión de agua en el suelo utilizando el modelo de Green y Ampt. Los resultados muestran una conductividad hidráulica en saturación inferior a la que se obtiene en el laboratorio sobre muestra inalterada, o bien en medidas extensivas de campo, lo que indica la localización del fenómeno de la hidrofobia, así como su variación temporal. Se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo a los diferentes parámetros, resultando ser el más importante la conductividad hidráulica saturada.

**ABSTRACT.** The presence of hydrophobic compounds in the surface of the sand grains in the soils of the coastal dune field of the SW of the Iberian peninsula delays the water infiltration generating runoff flows. Although the hydrologic conditions of the area are not prone to runoff formation, soils with large pores and a flat surface, there are many evidences of surface flows in the local Geomorphology. The main water transmitting parameters of the soil have been identified in several field tests with a rainfall simulator. The hydraulic conductivity of the soil at saturation is almost the fourth part of the field measured value in a larger area during a long period of time. A sensitivity analysis reveals that the hydraulic conductivity at saturation is the most important parameter of the Green and Ampt model used for the description of the runoff generation process.

### 1.- Introducción

Existen en la Naturaleza numerosas sustancias repelentes al agua que pueden acumularse circunstancialmente en el suelo. Esto puede ocurrir bien de forma periódica, como en el caso de las secreciones de numerosas plantas que se esparcen sobre la superficie del suelo, o bien esporádicamente, a consecuencia de algún incendio. En ambos casos los compuestos hidrofóbicos se acumulan en

algún horizonte subsuperficial al que acceden por alguna grieta (e.g. Booker y col., 1993) y el agua se infiltra en el suelo con menor velocidad de la que cabría esperar en condiciones no repelentes. Por ello las lluvias del Otoño, que suelen ser intensas en el SO de la Península, generan escorrentía cuando la intensidad con la que cae el agua sobre la superficie del suelo es superior a la velocidad de infiltración de éste, mermada por la presencia de sustancias hidrofobas. La circulación superficial del agua produce regueros y depósitos de sedimentos, entre otras formas de erosión, ya descrita en las dunas holandesas por Jungerius y Dekker (1990).

Los suelos arenosos tienen poros de gran tamaño debido al mal encaje de las partículas gruesas entre sí, lo que justifica una circulación rápida del agua y otros fluidos por su interior. Sin embargo, la superficie de los granos no presenta déficit de carga, por lo que no retiene fácilmente ni el agua ni otros compuestos químicos. Esto dificulta el mantenimiento de una población microbiana que sea capaz de descomponer los radicales hidrofobos que llegan preferentemente durante la estación seca (Moral y col., 2001).

En los suelos arenosos del Parque Natural de Doñana se han detectado amplias zonas que presentan repelencia al agua (Moral y col., 2001) y donde tiene lugar flujo lateral en circunstancias que de no existir repelencia no ocurriría

El objetivo de este trabajo es la caracterización del efecto de la repelencia sobre la producción de escorrentía mediante unos ensayos de campo con lluvia simulada y la utilización de un modelo que permita determinar los parámetros de infiltración. Al mismo tiempo se pretende determinar la influencia relativa de las variaciones en la determinación de los parámetros sobre el modelo.

### 2.- Material y métodos

Para la determinación de los parámetros de infiltración se realizaron ensayos de escorrentía con lluvia simulada en campo.

Estos ensayos se realizaron en las proximidades de El Abalario, dentro del Parque Natural de Doñana, donde se habían detectado amplias zonas en las que se manifiesta el fenómeno de la hidrofobia.

La zona estudiada constituye una unidad arenosa muy homogénea, formada por un manto eólico cuaternario (Holoceno) producto de la aparición sucesiva de diversos frentes de dunas, sobre la base de arenas y gravas del

Plioceno-Pleistoceno (*Salvany y Custodio, 1995*). Los suelos, sin horizontes diferenciados se clasifican como *xeropsamment típico*, franco-grueso, silicio y térmico (*Soil Conservation Service, 1975*) y tienen un espesor de más de 3 m.

La zona seleccionada tiene el suelo desnudo y por lo tanto los restos vegetales en la superficie del suelo son muy escasos. Las parcelas fueron elegidas en su mayor parte al azar salvo algunas parcelas con una pendiente mayor.

Puesto que las características de los suelos hidrófobos se ponen de manifiesto fundamentalmente en condiciones secas, se llevaron a cabo diez ensayos con una humedad superficial del suelo inicial muy baja, inferior a  $0.015 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . No obstante, para establecer comparaciones sobre la respuesta del suelo en la generación de escorrentía, se realizaron cinco experimentos durante la estación de lluvias, con el suelo más húmedo.

El simulador de lluvia utilizado, similar al descrito por *Chow y Harbaugh (1965)*, es capaz de suministrar una intensidad suficiente para generar escorrentía superficial. Concretamente en los ensayos realizados la intensidad de lluvia osciló entre  $1.46 \cdot 10^{-5}$  y  $5.65 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ .

El simulador está compuesto por una placa cuadrada de 50 cm de lado, de altura regulable, con un depósito de agua que, mediante un dispositivo de Mariotte mantiene un caudal constante. El borde inferior de la placa está atravesado por un gran número de pequeños agujeros, de diámetro inferior a 1 mm, homogéneamente repartidos por la superficie. Debajo de ésta se dispuso una malla metálica muy fina para partir las gotas de lluvia.

Se colocó un colector sobre el suelo para recoger la escorrentía. Una vez que se efectuaba un ensayo y se retiraba el simulador de la parcela correspondiente, se realizaba un muestreo del perfil humedecido. El tiempo de redistribución del agua aportada no fue en ningún caso superior a las dos horas.

Al mismo tiempo que se realizaban los ensayos y se efectuaba el muestreo posterior indicado, se llevaba a cabo una segunda toma de muestras en un lugar próximo a la parcela estudiada. Con ello se obtuvo la distribución real de la humedad en el perfil del suelo al inicio de los ensayos, que podía compararse con la obtenida después de la conclusión de los mismos.

### 3.- Modelo de generación de la escorrentía

Desde su formulación inicial por Richards en 1931, y las sucesivas contribuciones de diversos autores como John Philip, el movimiento del agua en el suelo es ampliamente conocido y en particular, el proceso de infiltración del agua bajo condiciones de flujo prescrito en la superficie (*e.g. Smith y col. 1993*). Para describir este proceso se ha recurrido a numerosas simplificaciones como la hipótesis de compresión de tiempo. Aunque se ha cuestionado la precisión de estas soluciones (*Sivapalan y Milly, 1989*), las evaluaciones más recientes (*Parlange y col., 2000*) indican que los errores implicados carecen de importancia en la mayoría de los suelos. *Smith y Parlange (1978)* distinguieron dos tipos extremos de suelos según que la

conductividad hidráulica en saturación aumentase rápidamente con la humedad en las proximidades del estado de saturación, o, por el contrario, lentamente. Este último caso corresponde a los suelos denominados por Philip *suelos delta* en los que el modelo de Green y Ampt se ajusta bastante bien a los resultados observados experimentalmente. Entre ambos tipos existe una gama de intergrados, si bien la diferencia de comportamiento entre ellos no es muy grande.

Usando las ecuaciones para el suelo delta se puede estimar el tiempo de inicio del encharcamiento en superficie,  $t_{ie}$ , por

$$\int_0^{t_{ie}} r dt = \frac{G\Delta\theta}{i/k_s - 1} \quad (1)$$

en la que  $r$  representa la intensidad de lluvia,  $[\text{LT}^{-1}]$ ;  $t$  el tiempo,  $[\text{T}]$ ;  $i$  la intensidad de infiltración,  $[\text{LT}^{-1}]$ ;  $k_s$  la conductividad hidráulica del suelo en el estado de saturación,  $[\text{LT}^{-1}]$ ;  $\Delta\theta = \theta_s - \theta$ , la diferencia entre las humedades en los estados de saturación e inicial,  $[\text{L}^3 \text{L}^{-3}]$ ; y  $G$  el término capilar, o la componente matricial del potencial del agua en el suelo en el frente de humedecimiento,  $[\text{L}]$ . Si como sucede en estos ensayos la intensidad de la lluvia se mantiene constante, la ecuación (1) se reduce a

$$t_{ie} = \frac{G\Delta\theta}{r(i/k_s - 1)} \quad (2)$$

Tras iniciado el encharcamiento, o flujo de escorrentía, si el agua es evacuada de la superficie, la velocidad de infiltración está caracterizada por

$$k_s(t - t_{ie}) = I - I_{ie} - G\Delta\theta \ln \left( \frac{I + G\Delta\theta}{I_{ie} + G\Delta\theta} \right) \quad (3)$$

en la que  $I$  es la infiltración acumulada al cabo del tiempo  $t$ , e  $I_{ie}$  su valor en el estado inicial del encharcamiento. La relación entre la infiltración acumulada,  $I$  y la instantánea,  $i$ , procede de la versión de Green y Ampt de la ley de Darcy-Buckingham,

$$i = k_s(1 + G\Delta\theta / I) \quad (4)$$

Una vez que el agua se acumula en la superficie, escurre hacia la desembocadura del simulador en donde se mide el caudal. En este recorrido se produce un retraso que puede ser estudiado con las ecuaciones de Saint-Venant, o alguna simplificación de las mismas como el modelo de la onda cinemática, (*e.g. Giráldez y Woolhiser, 1996*). No obstante por lo corto del trayecto se puede despreciar el retraso aceptándose el proceso de infiltración como única componente del modelo.

Los tres parámetros del modelo son  $k_s$ ,  $\theta_s$  y  $G$ . De ellos la humedad en saturación,  $\theta_s$  y la inicial,  $\theta_b$ , pueden ser medidas en campo sin dificultad. Con los datos experimentales, velocidad de infiltración en determinados tiempos, se han de determinar los otros dos parámetros con ayuda de las ecuaciones (2)-(4). Por la falta de linealidad en estas ecuaciones hay que recurrir a métodos de optimización que reducen a un mínimo la función objetivo, suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores

observados y calculados, para lo que se ha usado el algoritmo de Rosenbrock (Clarke, 1973, § 6.6.2.2.1).

Para facilitar el proceso de optimización es preciso hallar el valor de la infiltración acumulada en (3), lo que se consigue con el método de Newton-Raphson partiendo de la solución aproximada propuesta por Stone y col. (1994),

$$I_* = t_* \left[ 1 + (2/t_*)^{0.5} - 0.2897 t_*^{0.2187} \right] \quad (5)$$

en la que la infiltración y el tiempo están normalizados, y corregido el tiempo con respecto a estado del encharcamiento incipiente,

$$I_* = \frac{I}{G\Delta\theta}$$

$$t_* = \frac{k_s}{G\Delta\theta} \left[ t - t_{ie} + I_{ie} - G\Delta\theta \ln(I_{ie} + G\Delta\theta) \right] \quad (6)$$

**4.- Resultados**

Cuando se excede la capacidad de infiltración del suelo, y no hay detención superficial, se forma escorrentía por medio del mecanismo hortoniano, por igual en toda la superficie. Los ensayos efectuados en condiciones secas dieron lugar a escorrentía en todos los casos mientras que los ensayos en condiciones húmedas no siempre generaron escorrentía. En la Tabla 1 se exponen las condiciones en que se realizaron algunos de los ensayos representativos del proceso.

**Tabla 1:** Condiciones de los ensayos y resultados

Fecha	Cond. húmedas		Condiciones secas	
	11/11/96	15/1/97	25/9/96	14/7/98
Pendiente	0.01	0.11	0.15	0.0025
Humedad inicial (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0.060	0.107	0.017	0.014
Intens. de lluvia · 10 <sup>-5</sup> (m/s)	1.47	1.98	2.65	6.02
Lluvia total · 10 <sup>-3</sup> (m)	21.1	14.8	11.2	29.0
Tiempo encharcamiento (s)	-	125	175	225
Exceso de lluvia · 10 <sup>-3</sup> (m)	-	1.37	5.72	0.82

Al ajustar el modelo propuesto a las intensidades de infiltración del agua en el suelo obtenidas en los ensayos, se obtuvieron los valores que se recogen en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros obtenidos ajustando el modelo

Fecha	Cond. húmedas		Condiciones secas	
	11/11/96	15/1/97	25/9/96	14/7/98
k <sub>s</sub> · 10 <sup>-5</sup> (m/s)	-	1.684	4.225	4.774
GΔθ · 10 <sup>-3</sup> (m)	-	0.256	1.109	2.340
ecm · 10 <sup>-5</sup> (m/s)	-	0.9269	1.634	1.726
Escorrentía · 10 <sup>-3</sup> (m)	-	11.8	2.14	5.03

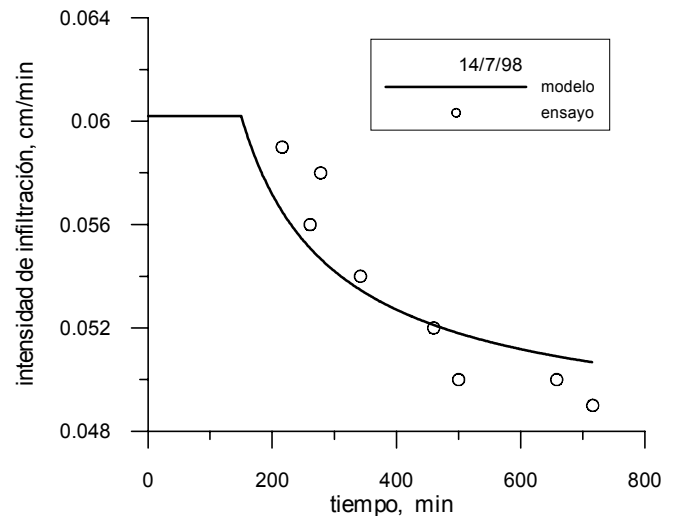
El ajuste, en los casos en los que se originó escorrentía fue bueno como indica el error cuadrático medio, ecm, en la Tabla 2, cuando se usa la velocidad de infiltración como función objetivo. La Fig. 1 muestra la bondad del ajuste para el ensayo del 14 de julio de 1998. Adviértase, sin embargo, que el volumen final de escorrentía no coincide cuando se obtiene con el modelo, Tabla 1, o cuando se mide experimentalmente.

Los valores estimados de la conductividad hidráulica en saturación son inferiores a los que se han determinado en la

misma zona con el método de Philip (1993) por de Haro y col. (1998), o medido en muestra inalterada en laboratorio, k<sub>s</sub> ∈ (1.5 · 10<sup>-4</sup> - 1.6 · 10<sup>-4</sup>) ms<sup>-1</sup>. Esto indica que en algunas zonas del suelo se reduce la transmisividad del agua con respecto a condiciones normales, en superficies más extensas y periodos prolongados de tiempo, pues la repelencia al agua es bastante estacional en estos suelos. La irregularidad espacial a que este fenómeno da lugar pudiera explicar la presencia de numerosas lagunas en el Parque Natural de El Abalarío. Por lo demás los valores obtenidos no son muy diferentes de los que para esta clase textural han obtenido otros (Chow y col. 1988, Tabla 4.3.1).

Los ensayos expuestos en las tablas corresponden a condiciones secas, veranos del 96 y 98, y a condiciones húmedas, noviembre del 96 y enero del 97. En un caso, noviembre de 1996, no se generó escorrentía, aunque se ha mantenido en las tablas a modo de contraste con las otras condiciones.

Los chubascos reproducidos con el simulador de lluvia tenían una intensidad elevada. En un suelo arenoso con una elevada conductividad hidráulica en saturación, no es probable que escurra el agua de lluvia si la intensidad es pequeña. Se ha observado como en algunos aguaceros que ocurren durante el verano o al comienzo de la estación húmeda, las intensidades de lluvia son muy próximas o exceden a las registradas durante los ensayos, especialmente durante el último trienio húmedo 1995-97.



**Fig. 1-** Evolución de la velocidad de infiltración en un ensayo efectuado en condiciones secas en El Abalarío el 14 de julio de 1996.

**5.- Análisis de sensibilidad**

Para comprobar la transcendencia de pequeñas desviaciones en el resultado es conveniente efectuar un análisis de sensibilidad. Para ello se han seleccionado la conductividad hidráulica en saturación, k<sub>s</sub>, y la función de forzado capilar, GΔθ, como parámetros de mayor relevancia. Usando el criterio de sensibilidad logarítmica, que es el de mayor utilidad por la normalización de los cambios de las variables de entrada y salida, (e.g. Kabala, 2001), se define la sensibilidad, S como

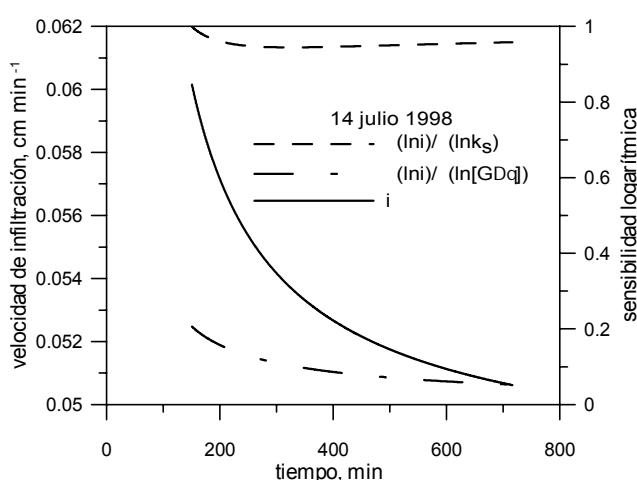
$$S = \frac{\partial R}{R} \frac{E}{\partial E} = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln E} \quad (7)$$

Siendo  $R$  la función de salida, o resultado, y  $E$  la función de entrada. Manipulando las ecuaciones (2)-(4) se deduce, para la sensibilidad de la velocidad de infiltración con respecto a la conductividad hidráulica en el estado de saturación,  $S_{k_s-i}$ ,

$$S_{k_s-i} = \frac{\partial \ln i}{\partial \ln k_s} = 1 - \frac{(i-k_s)^2}{G\Delta\theta} \left[ t - \frac{k_s G\Delta\theta}{r(r-k_s)} \right] \quad (8)$$

y para la función de forzado capilar,  $G\Delta\theta$ ,  $S_{G\Delta\theta-i}$ ,

$$S_{G\Delta\theta-i} = \frac{\partial \ln i}{\partial \ln(G\Delta\theta)} = \frac{(1-k_s)^2}{G\Delta\theta} t \quad (9)$$



**Fig. 2** Evolución de la sensibilidad del modelo con respecto a la conductividad hidráulica en saturación y a la función de forzado capilar. Se incluye también la variación de la velocidad de infiltración.

La Fig. 2 muestra cómo varía la sensibilidad durante el tiempo en el periodo post-encharcamiento, tras el inicio de la generación de escorrentía. Destaca el alto valor de la sensibilidad con respecto a la conductividad hidráulica en saturación, lo que refleja la gran importancia de este parámetro en el modelo, y, simultáneamente, la conveniencia de efectuar ensayos cuidadosamente en el campo y con abundantes datos y repeticiones. La función de forzado capilar,  $G\Delta\theta$  está representada de forma conjunta por conveniencia, si bien se pueden separar fácilmente los efectos de la diferencia entre la humedad inicial y la de saturación y la componente matricial del potencial del agua en el suelo en el frente de saturación. En cualquier caso es un parámetro menos sensible que  $k_s$ ,

## 6.- Conclusiones

La presencia de sustancias hidrófobas en la superficie de los suelos arenosos del Parque Natural de Doñana causa escorrentía durante episodios de lluvia intensa en las proximidades de la estación seca debido a que la

conductividad hidráulica en saturación se reduce apreciablemente.

Un modelo tan simple como el de Green y Ampt describe bastante bien el proceso de generación del exceso de lluvia hortoniano. En este modelo la conductividad hidráulica en saturación es el parámetro más sensible como detecta el análisis de sensibilidad.

La heterogeneidad espacial con la que aparecen las zonas repelentes se traduce en la aparición de focos de escorrentía dispersos, cuyas formas son evidentes en el Parque.

El aumento del volumen de escorrentía supone, además de una alteración en el balance del agua en el suelo, un agente de dispersión y posiblemente de contaminación en el parque. Aumenta también el riesgo de avenidas originadas por lluvias torrenciales en los bordes de las dunas en las que la repelencia reduce la velocidad de infiltración y la pendiente acelera el flujo del agua por la superficie.

## 7.- Referencias

- Booker, F.A., W.E. Dietrich, y L.M. Collins, 1993, Runoff and erosion after the Oakland firestorm, *Cal. Geol.* 46:159-73.
- Chow, V.T., y Harbaugh, T.E. 1965. Raindrop production for laboratory watershed experimentation. *Journal of Geophysical Research.* 70:6111-6119.
- Chow, V.T., D.R. Maidment, y L.W. Mays, 1988, Applied Hydrology, McGraw-Hill, Nueva York.
- Clarke, R.T., 1973, *Mathematical models in hydrology*, FAO irrig. drain. papers 19, Roma.
- Giráldez, J.V. y D.A. Woolhiser, 1996, Analytical integration of the kinematic equation for runoff on a plane under constant rainfall rate and Smith and Parlange infiltration, *Water Resour. Res.* 32:3385-9.
- de Haro, J.M., K. Vanderlinden, J.A. Gómez, y J.V. Giráldez, 1998, Medida de la conductividad hidráulica saturada del suelo con el infiltrómetro de Philip-Dunne: aplicabilidad y limitaciones, en A. González y col., eds. *Progresos en la Investigación en Zona No Saturada*, Univ. Huelva, pp 9-20.
- Jungerius, P.D. y L.W. Dekker, 1990, Water erosion in the dunes, *Catena Suppl.* 18:185-93.
- Kabala, Z.J., 2001, Sensitivity analysis of a pumping test on a well with wellbore storage and skin, *Adv. Water Resour.* 24:483-504.
- Moral, F.J., J.V. Giráldez y A. M. Laguna, 2001, La hidrofobia en los suelos arenosos del parque natural de Doñana: caracterización y distribución. *Ingeniería del agua*. Aceptado para publicar.
- Parlange, J.-Y., W. Hogarth, P. Ross, M.B. Parlange, M. Sivapalan, G.C. Sander y M.C. Liu, 2000, A note on the error analysis of time compression approximations, *Water Resour. Res.* 36:2401-6.
- Philip, J.R. 1993, Aproximate analysis of falling-head lined borehole permeameter, *Water Resour. Res.* 29:3763-8.

- Salvany, J.M., y Custodio, E. 1995. Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. *Rev. Soc. Geol. España*. 8:(1-2):21-31.
- Sivapalan, M. y P.C.D. Milly, 1989, On the relationship between the time condensation approximation and the flux-concentration relation, *J. Hydrol.* 105:357-67.
- Smith, R.E., C. Corradini, y F. Melone, 1993, Modeling infiltration for multistorm runoff events, *Water Resour. Res.* 29:133-44.
- Smith, R.E. y J.-Y. Parlange, 1978, A parameter-efficient hydrologic infiltration model, *Water Resour. Res.* 14:533-8.
- Soil Conservation Service. 1975. *Soil taxonomy*. USDA Agr. hbk. no. 436. Washington.
- Stone, J.J., R.H. Hawkins, y E.D. Shirley, 1994, Approximate form of Green-Ampt infiltration equation, *J. Irrig. Drain. Engng.* 120:128-37.