

UNA NUEVA HERRAMIENTA PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS SUELOS A LOS PROCESOS DE SUFOSIÓN O PIPING: EL PINHOLE TEST

E. NADAL-ROMERO^{(1, 2)*}, E. VERACHTERT⁽¹⁾, R. MAES⁽¹⁾, J. POESEN⁽¹⁾

¹Departament of Earth and Environmental Sciences, Geography Division.
K.U. Leuven. Celestijnenlaan 200 E, box 2409, 3001 Heverlee (Bélgica).

²Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio.
Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna 12, 50009- Zaragoza.

RESUMEN. *Los procesos de piping o sufosión se han observado en paisajes naturales y antrópicos, en diferentes litologías y climas, y bajo diferentes usos del suelo y cubiertas vegetales. Sin embargo, a pesar de su importancia, no existe una metodología estándar que permita evaluar la susceptibilidad de los suelos a los procesos de sufosión o piping. El pinhole test, originalmente desarrollado por Sherard et al. en 1976 es un test empírico basado en la evaluación cualitativa y directa de la susceptibilidad de los suelos a la dispersión y a los procesos de piping o sufosión. Los objetivos de este trabajo son evaluar una metodología de trabajo, el pinhole test, y establecer recomendaciones y conclusiones acerca de la idoneidad de su uso, además de estudiar los efectos de diferentes gradientes hidráulicos, de la calidad del agua y del contenido de humedad del suelo en la respuesta hidrológica y sedimentológica.*

Los primeros ensayos se han realizado con el horizonte superficial A_p , de un suelo agrícola localizado en Heverlee (Bélgica central). Las pruebas se han realizado con diferentes contenidos de humedad, bajo 4 gradientes hidráulicos (50, 180, 380 y 1020 mm) y con dos calidades de agua (agua del grifo y agua destilada). Los resultados indican: (i) un aumento de la respuesta hidrológica (Q_w) y de la respuesta erosiva (Q_s) cuando se produce un incremento de gradiente hidráulico, (ii) una tendencia negativa (no significativa) entre el contenido de humedad y la respuesta hidrológica y erosiva, y (iii) una respuesta hidrológica y sedimentológica mayor en los experimentos realizados con agua destilada. Este estudio sugiere que el pinhole test es un método adecuado para evaluar de manera cuantitativa (Q_w , Q_s , tiempo de respuesta y el diámetro final del agujero) la susceptibilidad de los suelos u horizontes del suelo a los procesos de sufosión o piping. Para ello recomendamos (i) al menos el uso de dos gradientes hidráu-

licos contrastados (p.e. 180 y 1020 mm), (ii) el uso de agua destilada, y (iii) de diferentes contenidos de humedad

Pinhole test for assessing the piping erosion susceptibility of soils

ABSTRACT. *Piping has been observed in natural and anthropogenic landscapes, in different lithologies and climates, and under different types of land uses and vegetation covers. Despite its importance, no standard widely-applied methodology exists to assess susceptibility of soils to piping. The pinhole test, originally developed by Sherard et al. in 1976 is an empirical test based on the qualitative evaluation of the dispersibility (colloidal erodibility) of compacted fined-grained soils. This study aims at evaluating the pinhole test for assessing the susceptibility of soils to piping and establishes recommendations to use the pinhole test, and assesses the effects of hydraulic head, water quality and soil moisture content on the hydrological and erosion responses.*

Topsoil A_p horizon samples with different moisture contents were taken in Central Belgium. Four hydraulic heads (50, 180, 380 and 1020 mm) and two water qualities (tap and distilled water) were used in the laboratory. The results show: (i) a linear increase in pipe flow discharge (Q_w) and sediment discharge (Q_s) with increasing hydraulic head, (ii) a negative trend (not significant) for Q_w and Q_s with increasing soil moisture content, and (iii) significantly higher Q_w and Q_s for distilled water than for tap water. This study indicates that the pinhole test is suitable for assessing the susceptibility of soil horizons to piping in a quantitative way (Q_w , Q_s , the time to flow out and the hole size after the test). We recommend the use of: (i) two different and contrasting hydraulic heads (i.e. 180 and 1020 mm), (ii) distilled water, and (iii) different soil moisture contents.

Palabras clave: piping, pinhole test, gradiente hidráulico, contenido de humedad del suelo, calidad del agua.

Key words: piping, pinhole test, hydraulic head, soil moisture content, water quality.

Enviado el 28 de enero de 2011

Aceptado el 12 de marzo de 2011

* Correspondencia: Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza. E.mail: estelanr@unizar.es

1. Introducción

El término *piping* (erosión en túnel), definido por numerosos autores (p.e. Jones, 1981) se usa para describir los procesos de erosión subsuperficiales. Chorley (1978) definió el *piping* como la formación de conductos naturales en el suelo o en otros depósitos no consolidados por eluviación o por procesos de erosión diferencial subsuperficial.

El proceso también es definido como la erosión por la cual el suelo es transportado por el agua de escorrentía a través de agujeros subterráneos (Heede, 1971). La consecuencia de los procesos de sufosión es la formación de una red de conductos subsuperficiales de tamaño variable. Durante muchos años, la investigación en erosión se ha centrado en la erosión hídrica superficial, mientras los procesos de sufosión han recibido una menor atención. Sin embargo, hay que resaltar la importancia de dichos procesos, porque pueden ser responsables de elevadas tasas de erosión y producción de sedimento.

Los factores que intervienen en la formación y desarrollo de los conductos subsuperficiales pueden ser de origen diverso: mecánicos, químicos o bióticos. De entre los factores esgrimidos con mayor frecuencia están: la existencia de un gradiente hidráulico importante, diferencias de porosidad-permeabilidad en los distintos horizontes del suelo que favorecen la circulación horizontal y la evolución de conductos inmediatamente por encima del nivel impermeable, y la presencia de madrigueras, raíces o grietas (Parker, 1964). Sin embargo, la principal razón de la ocurrencia de *piping* está en las características físico-químicas del suelo: presencia de arcillas expansivas, valores de SAR superiores a 0,4 y altos valores de dispersión y de sodio intercambiable (Ternan *et al.*, 1998). En general, son materiales de baja resistencia a la erosión hídrica y con un elevado contenido en sales, que también favorecen la formación de cárcavas (Gutiérrez-Elorza *et al.*, 1988).

La importancia de los procesos de sufosión en la erosión y en las pérdidas de suelo ha suscitado su interés por parte de muchos grupos de investigación. Los procesos de sufosión o *piping* fueron descritos por primera vez en las regiones semiáridas y más tarde en regiones húmedas. En Europa se han estudiado tanto en ambientes semiáridos, donde ocurren de manera muy común, como en áreas húmedas, y en áreas de cultivo subhúmedas, especialmente en regadío. Faulkner (2006) realizó una revisión, "Piping Hazard on Collapsible and Dispersive Soils in Europe", y diferenció 3 contextos en los que los procesos de sufosión pueden ser relativamente importantes en Europa: (i) *piping* en los Gleysoles y turberas orgánicas (Histosoles) del norte de Europa; (ii) *piping* en los suelos desestructurados derivados de la acumulación de Loess en el norte y centro de Europa (Fig. 1A); y (iii) *piping* en los suelos dispersivos del sur-sureste de Europa (Fig. 1B).

Son muchos los trabajos sobre *piping* que se han desarrollado en áreas acarcavadas en ambientes semiáridos (p.e. López Bermúdez y Romero Díaz, 1989; Benito *et al.*, 1991; Faulkner *et al.*, 2000; Torri *et al.*, 2002; Romero Díaz *et al.*, 2007a, 2007b, 2009). Harvey (1982) sugirió la estrecha relación existente entre los procesos de *piping* y la evolución de badlands en el sureste de España; o Gutiérrez-Elorza *et al.* (1997) estudiaron en detalle los procesos de *piping* en distintos puntos de la Depresión del Ebro. Sin embargo, menos atención han recibido los procesos de sufosión en zonas húmedas del norte de Europa (Malinowski, 1963; Poesen, 1989; Jones, 1997; Botschek *et al.*, 2000a, 2000b; Verachtert *et al.*, 2010) o en campos de cultivo, especialmente en regadío. En la Rioja han sido estudiados por García-Ruiz *et al.* (1986, 1997), quienes comprobaron que su evolución está sujeta a factores similares a los de los pipes de ambientes semiáridos:



Figura 1. (A) Piping desarrollado en ambientes húmedos, en suelos desestructurados derivados de la acumulación de Loess en las Ardenas (Bélgica); (B) Piping desarrollado en ambiente semiárido de la Depresión del Ebro (Botorríta, España).

elevados gradientes hidráulicos generados por la altura entre dos terrazas de cultivo, sales solubles en el suelo y disminución de la permeabilidad en profundidad.

A pesar de la importancia de este proceso, su estudio ha estado muy limitado por la dificultad de analizar el proceso en el campo y también en el laboratorio. En 1976 Sherard *et al.* propusieron un instrumento de laboratorio denominado “pinhole test” para medir la susceptibilidad de los suelos a los procesos de sufosión, relacionados principalmente con obras de ingeniería hidráulica (presas, canales de riego...), mediante la simulación de un flujo de agua a través de un pequeño orificio realizado en una muestra de suelo, aplicando un determinado gradiente hidráulico. En un primer momento el test fue desarrollado como una medida cualitativa y directa de la erodibilidad de los suelos para identificar suelos arcillosos dispersivos o altamente erosionables. Desde 1976 este test se ha convertido en un ensayo físico ampliamente usado por ingenieros y técnicos. Sin embargo, son pocas las veces que se ha aplicado a estudios geomorfológicos. Por este motivo, los principales objetivos de este trabajo son: (i) valorar una nueva metodología, el pinhole test, para evaluar la susceptibilidad de los suelos a los procesos de sufosión o *pinning*; (ii) evaluar los efectos de diferentes gradientes hidráulicos, de la calidad del agua, y del contenido de humedad del suelo en la respuesta hidrológica y sedimentológica; y (iii) establecer recomendaciones y conclusiones acerca de la idoneidad de esta herramienta para estudiar los procesos de erosión subsuperficial.

2. Materiales y métodos

El pinhole test fue desarrollado en la década de los 70 (Sherard *et al.*, 1976a, 1976b) con el fin de evaluar la susceptibilidad de los suelos a los procesos de *pinning* o sufosión, principalmente en estudios de obras de ingeniería hidráulica, en concreto, en la construcción de presas en Australia (Sherard *et al.*, 1976a). La metodología precisa y los procesos a seguir se describen en Sherard *et al.* (1976a) y en ASTM D4647-93.

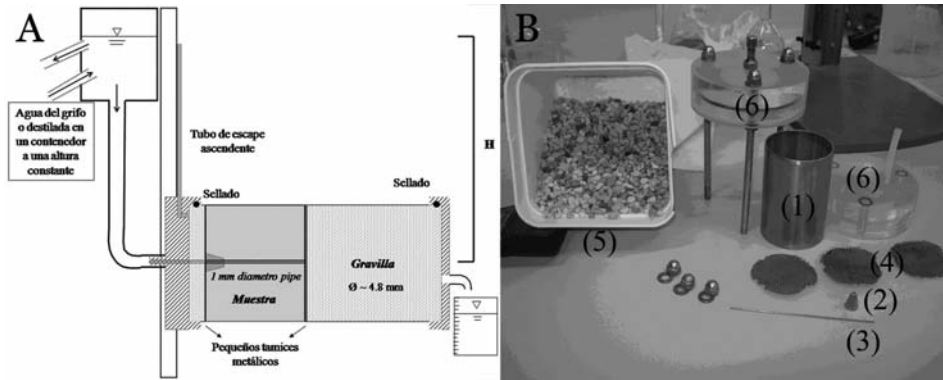


Figura 2. (A) Esquema ilustrativo del pinhole test. (B) Componentes del pinhole test: (1) cilindro de acero inoxidable; (2) estructura metálica en forma de cono con un agujero de 1,5 mm de diámetro; (3) aguja hipodérmica, con 1 mm de diámetro; (4) tamices metálicos; (5) grava (4-8 mm de diámetro); (6) estructura para encajar el cilindro con la muestra de suelo.

El test original se basa en la simulación de un flujo de agua (aplicando un determinado gradiente hidráulico (50, 180, 380 y 1020 mm) a través de un pequeño orificio (1 mm de diámetro) realizado en una muestra de suelo (Fig. 2A). El agua destilada fluye durante 5 o 10 minutos en cada gradiente hidráulico. La prueba se realiza mediante el incremento gradual de la presión de entrada desde 50 mm a 180 mm, y posteriormente 380 y 1020 mm. Según Sherard *et al.* (1976a) el test se reproduce fácilmente, y los resultados de cada test pueden ser analizados y clasificados de manera rápida y sencilla. El material o suelo analizado se clasifica en 6 categorías (ver Tabla 1), en función del flujo final de agua generado a través de la muestra ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$), el color de la muestra de agua al final de la prueba, y el diámetro del agujero al finalizar el test (mm).

En nuestro estudio inicial los experimentos se realizaron con muestras alteradas de suelo. Para ello se han aplicado adaptaciones en la preparación de las muestras y también en el instrumental. La metodología aplicada se propuso por primera vez en Nadal-Romero *et al.* (2009). En primer lugar el material, horizonte o suelo objeto de estudio debe secarse a temperatura ambiente (20 °C) durante 3 días, y posteriormente tamizarse con un tamiz con un tamaño de 1,25 cm de diámetro. A continuación, se realizan experimentos de simulación de lluvia (durante 1 hora) para conseguir unas condiciones de compactación estándar. Una vez finalizada la simulación de lluvia, se recogen las muestras usando un cilindro de acero inoxidable con un diámetro de 5 cm y una longitud de 8 cm (Fig. 2B). Se introduce el cilindro 4 cm en el material compactado y se toma una muestra de 4 cm de longitud (siendo el volumen total de la muestra de 78,5 cm^3).

Para conseguir una valoración más cuantitativa y objetiva se examina cada minuto (durante un periodo de 5 minutos): (i) el tiempo de respuesta (definido como el tiempo que transcurre desde el inicio del flujo de agua y el inicio de la respuesta hidrológica),

Tabla 1. Clasificación de los suelos en función de los resultados obtenidos con el Pinhole Test (basado en Sherard et al., 1976a)

Clasificación de los suelos en función de los análisis de laboratorio	H (mm)	Respuesta hidrológica final ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	Diámetro del agujero final (mm)	Clasificación
D1	50	Muy nítido	> 2	Suelos dispersivos: erosión muy rápida en 50 mm H
D2	50	Nítido-claro	> 2	
ND4	50	Fácilmente visible	< 1,5	Suelos intermedios: erosión lenta en 50 mm H
ND3	180-380	Fácilmente visible	> 2	
ND2	1020	Claro o apenas visible	2	Suelos no dispersivos: no erosión en 380 mm o 1020 mm H
ND1	1020	Transparente	1 (no erosión)	

(ii) la respuesta hidrológica o flujo (Q_w , $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) y (iii) la respuesta de sedimento (Q_s , g s^{-1}), (iv) el color del flujo final, y (v) el diámetro del agujero al finalizar el test (mm).

Para conocer el efecto de la calidad del agua en la respuesta hidrológica y sedimentológica los experimentos se han realizado con agua del grifo (TW) y agua destilada (DW) (con una conductividad eléctrica de 800 y 26 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente). Finalmente se ha trabajado con diferentes contenidos de humedad del suelo (secando el material en la estufa a 30 °C durante diferentes intervalos de tiempo) para estudiar el efecto de la humedad del suelo en la respuesta hidrológica y sedimentológica.

En estas primeras series de experimentos de calibración y puesta a punto, los ensayos se han realizado con el horizonte superficial A_p , (horizonte limo-arcilloso) de un suelo de cultivo localizado en Heverlee (Bélgica central), derivado de la formación Loess. La textura predominante es el limo (2-50 μm), presentando contenidos próximos al 80%. La fracción arcilla (inferior a 2 μm), representa un 12%, y finalmente, la fracción arena representa un 8%.

Se realizaron 3 réplicas para cada combinación de calidad de agua, gradiente hidráulico, y contenido de humedad del suelo. Más de 120 muestras de suelo fueron analizadas y más de 600 muestras de agua y sedimento fueron evaluadas en este primer trabajo.

3. Resultados

Los resultados de los diferentes experimentos con diferentes contenidos de humedad, diferentes gradientes hidráulicos (H) y con diferente calidad de agua (agua del grifo y agua destilada con una conductividad hidráulica de 800 y 26 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente) se presentan en las figuras 3, 4 y 5.

El efecto del gradiente hidráulico en la respuesta hidrológica y sedimentológica se muestra en la figura 3, representando la relación entre H y Q_w ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) y Q_s (g s^{-1}) bajo condiciones de humedad máximas y mínimas (0,42 y 0,04 g g^{-1}). Los resultados confirman que durante un experimento con una duración total de 5 minutos, con un gradiente hidráulico constante, se produce un incremento significativo de la respuesta hidrológica y sedimentológica. También se observa, un incremento de la respuesta hidrológica (Q_w), y un incremento significativo de la respuesta erosiva (Q_s) cuando se produce un cambio en el gradiente hidráulico (Fig. 3 y Tabla 2).

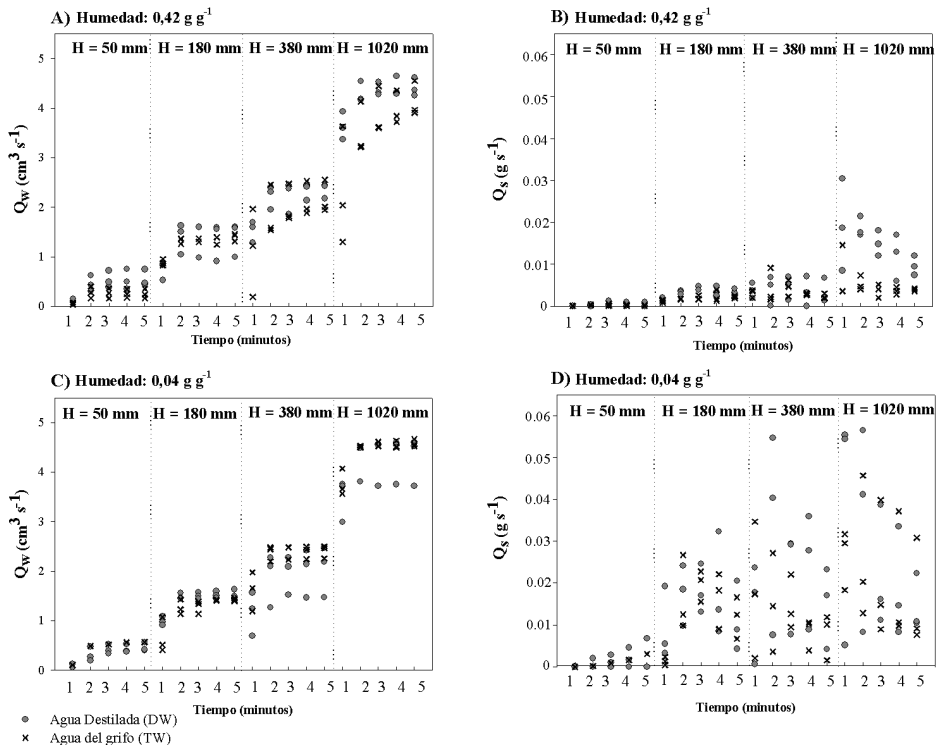


Figura 3. Evolución del flujo de agua (respuesta hidrológica, Q_w) y el material arrastrado (respuesta sedimentológica, Q_s) a diferentes gradientes hidráulicos, diferente contenido de humedad y diferente calidad de agua.

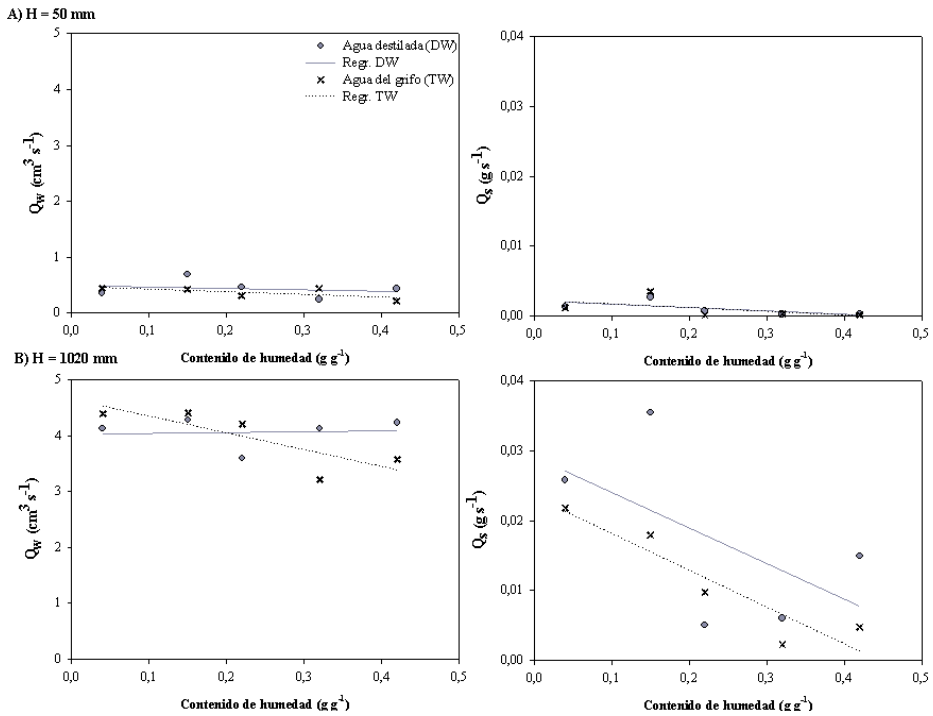


Figura 4. Relación entre el contenido de humedad del suelo y la respuesta hidrológica y sedimentológica (Q_w y Q_s) a diferentes gradientes hidráulicos con agua del grifo y agua destilada.

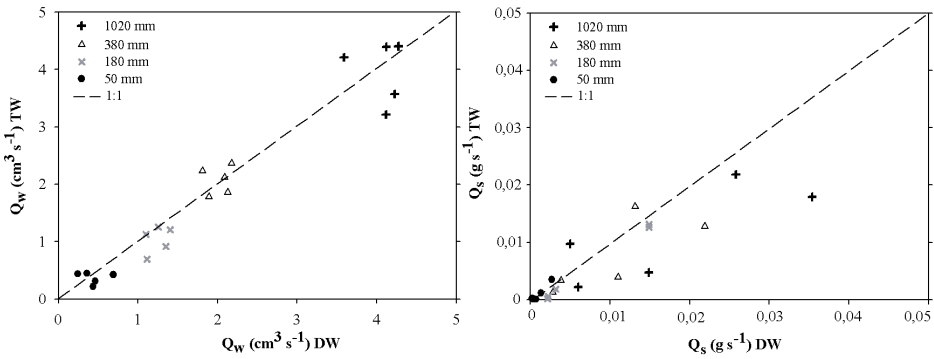


Figura 5. Relación entre los resultados hidrológicos y sedimentológicos obtenidos con agua de grifo (TW) y agua destilada (DW) a diferentes gradientes hidráulicos.

Tabla 2. Valores medios de la respuesta hidrológica (Q_w), respuesta sedimentológica (Q_s), tiempo de respuesta (s) y diámetro final del agujero (mm) de los experimentos realizados con el horizonte superficial A_p , con diferentes gradientes hidráulicos (H, mm) y diferentes calidades de agua (agua del grifo, TW y agua destilada, DW).

H (mm)	Q_w (cm ³ s ⁻¹)		Q_s (g s ⁻¹)		Tiempo de respuesta (s)		Diámetro final (mm)	
	TW	DW	TW	DW	TW	DW	TW	DW
50	0,37	0,44	0,001	0,001	37,9	35,8	1,4	2,32
180	1,04	1,24	0,006	0,007	19,5	19,7	2,1	2,2
380	2,07	2,02	0,008	0,01	16,1	12,9	2,1	2,7
1020	3,96	4,07	0,01	0,02	6,9	6,7	2,3	2,7

La figura 4 muestra el efecto del contenido de humedad del suelo en la respuesta hidrológica y sedimentológica. Aunque la relación no es estadísticamente significativa, se observa un débil descenso de los valores medios de Q_w cuando aumenta el contenido de humedad del suelo. La tendencia negativa es mucho más pronunciada en la respuesta sedimentológica (especialmente bajo el gradiente hidráulico de 1020 mm).



Figura 6. Agujero final después de la prueba de laboratorio.

La figura 5 ilustra el efecto de la calidad del agua en la respuesta hidrológica y sedimentológica. En general, la respuesta hidrológica es mayor en los experimentos realizados con agua destilada, especialmente con gradientes hidráulicos bajos. Se observa una influencia mayor de la calidad del agua en la respuesta sedimentológica, siendo los valores de Q_s mucho más elevados en los experimentos realizados con agua destilada (Tabla 2).

La tabla 2 presenta los valores medios del tiempo de respuesta (s) y del diámetro final del agujero (mm). En general, se observan respuestas más rápidas en los ensayos realizados con agua destilada (DW); también se observan respuestas mucho más rápidas aumentando el gradiente hidráulico (H).

La inspección visual del agujero al finalizar el experimento fue considerado uno de los criterios fundamentales para el estudio de la susceptibilidad a la dispersión de los suelos por Sherard *et al.* (1976a, 1976b) (Fig. 6). Sin embargo, en este trabajo se ha constatado que existen algunos problemas para identificar el diámetro final del agujero, y sólo ha sido posible identificarlo en un 40% de los experimentos. En general, los valores medios del diámetro final indican que el diámetro es mayor en los experimentos realizados con agua destilada, y que el diámetro es mayor en los experimentos realizados con un gradiente hidráulico (H) más alto (380 y 1020 mm).

4. Discusión

Los procesos de *piping* se han observado tanto en paisajes naturales como antrópicos, en diferentes litologías, diferentes usos del suelo y cubiertas vegetales, y en diferentes climas (Parker, 1964; Heede, 1971; Jones, 1981; Bryan y Jones, 1997; Faulkner, 2006; Romero Díaz *et al.*, 2007a). Dichos procesos han sido estudiados por muchos grupos de investigación en las últimas décadas, aunque han recibido menor atención que los procesos de erosión superficial. Jones sugirió en 1997 la necesidad de estudiar los procesos de *piping* mediante: (i) estudios de modelización, (ii) monitorización cuantitativa de los procesos, y (iii) experimentos de laboratorio. En esta última línea, nuestro estudio confirma que el pinhole test es un método adecuado para determinar y evaluar la susceptibilidad de los suelos a los procesos de *piping*. Sin embargo, esta evaluación no debe de hacerse solamente de manera cualitativa como propusieron Sherard *et al.* (1976a), y por ello, es necesario implementar medidas cuantitativas que proporcionen una medida directa y objetiva de la susceptibilidad de los suelos a los procesos de sufosión o *piping*: p.e. la respuesta hidrológica o flujo (Q_w , $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$), la respuesta sedimentológica (Q_s , g s^{-1}), el tiempo de respuesta (s) y el diámetro final del agujero (mm). Después de realizar la puesta a punto y calibración de la metodología, recomendamos la aplicación del pinhole test porque: (i) es un test fácilmente reproducible, (ii) es relativamente rápido (solo son necesarios alrededor de 10 minutos para cada muestra), (iii) su aplicación no resulta muy cara (aunque sería necesario disponer de cantidades importantes de agua destilada), y (iv) solo son necesarias pequeñas cantidades de suelo (78,5 cm^3 por muestra). Además, los resultados obtenidos en el laboratorio son consistentes con los datos observados en diferentes trabajos de campo (p.e. Poesen *et al.*, 1996).

De manera general y de forma muy resumida se observa: (i) un incremento significativo de la respuesta hidrológica (Q_w) y de la respuesta erosiva (Q_s) cuando se produce un cambio en el gradiente hidráulico; (ii) la respuesta hidrológica es mayor y la respuesta erosiva es mucho mayor en los experimentos realizados con agua destilada; (iii) pero sin embargo, no se observa una clara tendencia en relación a los diferentes contenidos de humedad; aunque, en general, la relación entre el contenido de humedad y la respuesta hidrológica y erosiva presenta tendencias negativas.

Los resultados obtenidos en este trabajo, permiten constatar, como ya ha sido hecho por otros muchos autores, la importancia del gradiente hidráulico como uno de los factores principales en la generación y desarrollo de pipes (p.e. Barrón *et al.*, 1994; Romero-Díaz *et al.*, 2009).

El uso de agua del grifo y de agua destilada permite observar las tendencias generales de las respuestas. Sin embargo, se han registrado Q_s más elevados cuando se utiliza agua destilada. Estos resultados coinciden con otros experimentos realizados en el laboratorio mediante simulaciones de lluvia (Borselli *et al.*, 2001). Asimismo, Flanagan *et al.* (1997) concluyeron que la calidad del agua no es significativa en la respuesta hidrológica final, pero sí en la respuesta sedimentológica final, porque ésta es mucho mayor en los experimentos realizados con agua destilada (tal y como se ha observado en este estudio). Por todo ello, sugerimos el uso de agua destilada cuando se quieran alcanzar valores reales y cuando se realicen comparaciones entre diferentes suelos u horizontes.

Por otro lado, la relación negativa entre la respuesta hidrológica (Q_w) y la respuesta sedimentológica (Q_s), y el contenido de humedad ha sido también observada en diferentes trabajos de investigación (Govers *et al.*, 1990; Govers, 1991; Knapen *et al.*, 2007). No obstante, Sherard *et al.* (1976a) concluyeron que la humectación y secado de las muestras de suelo puede causar un desequilibrio, que podría afectar a los resultados del pinhole test. No obstante, proponemos el uso de diferentes contenidos de humedad para observar los diferentes comportamientos de las respuestas hidrológicas y sedimentológicas.

Los resultados obtenidos en este trabajo experimental muestran que el horizonte superficial (A_p) puede ser clasificado según la clasificación propuesta por Sherard *et al.* (1976a) como ND4 (suelos intermedios), lo que significa que los procesos de sufosión se producen levemente bajo el gradiente hidráulico de 50 mm, y pueden evolucionar rápidamente cuando existe un gradiente hidráulico mayor. En este sentido, Nadal-Romero *et al.* (aceptado) analizaron la susceptibilidad a los procesos de sufosión o piping de 4 horizontes de suelo (A_p , B_t , C_1 y C_2) en la formación Loess. Los resultados han demostrado la diferente susceptibilidad de los diferentes horizontes del suelo, presentando el horizonte más profundo (horizonte calcáreo, C_2) la mayor susceptibilidad a los procesos de erosión por piping. Estos resultados indican que los horizontes A_p y B_t son al menos dos veces más resistentes que los horizontes subyacentes C_1 y C_2 . Según la clasificación de Sherard *et al.* (1976a) (Tabla 1), los horizontes C_1 (decalcificado) y C_2 (calcáreo) corresponden con la categoría D2 (dispersivos) mientras los horizontes superficiales (A_p y B_t) corresponderían a la categoría ND4.

5. Conclusiones

El pinhole test es un método apropiado para evaluar la susceptibilidad de los suelos u horizontes del suelo a los procesos de sufosión o piping. Sin embargo, el examen visual y subjetivo debe abandonarse y por ello es necesario implementar medidas cuantitativas que proporcionen una medida directa y objetiva. Las variables a analizar son: la respuesta hidrológica o flujo (Q_w , $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$), la respuesta sedimentológica (Q_s , g s^{-1}), el tiempo de respuesta (s) y el diámetro final del agujero (mm). Nuestras recomendaciones incluyen: (i) el uso de al menos dos gradientes hidráulicos contrastados (p.e. 180 y 1020 mm) para producir diferentes grados de estrés; (ii) el uso de agua destilada; y (iii) utilizar diferentes contenidos de humedad para evaluar su influencia en la respuesta hidrológica y sedimentológica.

De forma resumida se observa: (i) un incremento significativo de la respuesta hidrológica (Q_w) y de la respuesta erosiva (Q_s) cuando se produce un incremento en el gradiente hidráulico; (ii) la respuesta hidrológica es mayor y la respuesta de sedimento mucho mayor en los experimentos realizados con agua destilada; y (iii) se observa una relación negativa entre el contenido de humedad y la respuesta hidrológica y erosiva.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con el apoyo del proyecto: “Procesos y balances de sedimentos a diferentes escalas espaciales en ambientes mediterráneos: Efectos de las fluctuaciones climáticas y los cambios de uso del suelo” (PROBASE, CGL2006-11619/HID) financiado por la CICYT. El primer autor contó con un contrato postdoctoral del Ministerio de Ciencia e Innovación, mediante el Programa Nacional de Movilidad de Recursos Humanos del Plan nacional de I-D+I 2008-2011 y en la actualidad cuenta con un contrato postdoctoral del Ministerio de Ciencia e Innovación, del programa Juan de la Cierva. Finalmente, los autores querrían agradecer su ayuda a J. Meersmans por su ayuda y soporte técnico durante la construcción y consecuente adaptación de la instrumentación en el laboratorio.

Referencias bibliográficas

- ASTM D4647 (2006). Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, p. 11.
- BARRÓN, G., ECHEVERRÍA, M.T., IBARRA, P., MARCO, P., PÉREZ, F., (1994). Algunas consecuencias geomorfológicas del uso del suelo agrícola en las últimas décadas. La actividad del *piping* en el bajo valle del Huerva (Zaragoza, Spain). En: *Geomorfología*

- gía en España (Arnáez, J., García Ruiz, J.M., Gómez Villar, A., Eds.). Tomo II, pp. 255-266, Logroño.
- BENITO, E., GIOVANNINI, G., DÍAZ FIERROS, F., (1991). Effect of pH on dispersion of various soil suspensions and its relation to soil structural stability. *Agrochimica*, 35: 34-45.
- BORSELLI, L., TORRI, D., POESEN, J., SALVADOR-SANCHÍS, P., (2001). Effects of water quality on infiltration, runoff and interrill erosion processes during simulated rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 329-342.
- BOTSCHEK, J., KRAUSE, S., ABEL, T., SKOWRONEK, A., (2002a). Piping and erodibility of loessic soils in Bergischer Land, Nordrhein-Westfalen. *Journal of Plant Nutrient Soil Science*, 165 (2): 241-246.
- BOTSCHEK, J., KRAUSE, S., ABEL, T., SKOWRONEK, A., (2002b). Hydrological parameterization of piping in loess-rich soils in the Bergisches Land, Nordrhein-Westfalen, Germany. *Journal of Plant Nutrient Soil Science*, 165 (4): 506-510.
- BRYAN, R., JONES, J.A.A., (1997). The significance of soil piping processes: inventory and prospect. *Geomorphology*, 20: 209-218.
- CHORLEY, R.J., (1978). Glossary of terms. En: *Hillslope Hydrology* (Kirkby, M.J., Eds.). Wiley, pp 375-376, New York.
- FAULKNER, H., SPIVEY, D., ALEXANDER, R., (2000). The role of some site geochemical processes in the development and stabilisation of three badland sites in Almería, Southern Spain. *Geomorphology*, 35: 87-99.
- FAULKNER, H., (2006). Piping Hazard on Collapsible and Dispersive Soils in Europe. En: *Soil Erosion in Europe* (Boardman, J., Poesen, J., Eds.). John Wiley & Sons, Ltd., pp. 537-562, Chichester.
- FLANAGAN, D.C., NORTON, L.D., SHAINBERG, I., (1997). Effect of water chemistry and soils amendments on a silty loam-soil. Part II: soil erosion. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 40 (6): 1555-1561.
- GARCÍA-RUIZ, J.M., LASANTA, T., ORTIGOSA-IZQUIERDO, L., ARNÁEZ, J., (1986). Pipes in cultivated soils of La Rioja: origin and evolution. *Zeitschrift für Geomorphologie* (Suppl 58): 93-100.
- GARCÍA-RUIZ, J.M., LASANTA, T., ALBERTO, F., (1997). Soil erosion by piping in irrigated fields. *Geomorphology*, 20 (3-4): 269-278.
- GOVERS, G., EVERAERT, W., POESEN, J., RAUWS, G., DE PLOEY, J., LAUTRIDOU, J.P., (1990). A long flume study of the dynamics factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15 (4): 313-328.

- GOVERS, G., (1991). Time-dependency of runoff velocity and erosion: the effect of the initial soil moisture profile. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16 (8): 713-729.
- GUTIÉRREZ-ELORZA, M., SANCHO, C., BENITO, G., SIRVENT, J., DESIR, G., (1997). Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro basin, NE Spain. *Geomorphology*, 20: 237-253.
- GUTIÉRREZ-ELORZA, M., BENITO, G., RODRÍGUEZ-VIDAL, J., (1988). Piping in badland areas of the middle Ebro basin, Spain. *Catena Suppl.*, 13: 49-60.
- HARVEY, A., (1982). The role of piping in the development of badlands and gully systems in southeast Spain. En: *Badland geomorphology and piping* (Bryan, R., Yair, A., Eds.). Geobooks, pp. 317-336, Norwich.
- HEEDE, B.H., (1971). Characteristics and processes of soil piping in gullies. Unites States Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range. *Experiment Station Research Paper RM-68*, 15 pp.
- JONES, J.A.A., (1981). *The nature of Soil Piping, A Review of Research*. Geobooks, Norwich.
- JONES, J.A.A., (1997). Pipeflow contributing areas and runoff response. *Hydrological Processes*, 11 (1): 35-41.
- KNAPEN, A., POESEN, J., DE BAETS, S., (2007). Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 94 (2): 425-440.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F.L., ROMERO DÍAZ, M.A., (1989). Piping erosion and badland development in South-East Spain. *Catena Suppl.*, 14: 59-73.
- MALINOWSKI, J., (1963). Uwagi o wspol czynniku makroporowatosci lessow w Polsce. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 182 (2): 5-24.
- NADAL-ROMERO, E., VERACHTERT, E., POESEN, J., (2009). Pinhole test for identifying susceptibility of soils to piping erosion: effect of water quality and hydraulic head. En: *Advances in studies on desertification* (Romero Díaz, A., Belmonte Serrato, F., Alonso Sarria, López-Bermúdez, F., Eds.) Contributions to the International Conference on Desetification in memory of professor John B. Thornes. pp. 351-154. Murcia.
- NADAL-ROMERO, E., VERACHTERT, E., MAES, R., POESEN, J. (aceptado). Assessing the piping erosion susceptibility of loess-derived soil horizons using the pinhole test. *Geomorphology*.
- PARKER, C.G., (1964). Piping, a geomorphic agent in landform development of the drylands. En: *Land Erosion, Precipitation, Hydrometry, Soil Moisture*. Proceedings

- of the General Assembly of Berkeley, 19-31 August 1963. *International Association of Scientific Hydrology*, 65: 103-113.
- POESEN, J., (1989). Conditions for gully formation in the Belgian Loam Belt and some ways to control them. *Soil Technology Series*, 1: 39-52.
- POESEN, J., VANDAELE, K., VAN WESEMAEL, B., (1996). Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. En: *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives* (Proceedings of the Exeter Symposium July 1996). IAHS Publ. no. 236, pp. 251-266.
- ROMERO DÍAZ, M.A., MARÍN SANLEANDRO, O., SÁNCHEZ SORIANO, A., BELMONTE SERRATO, F. FAULKNER, H. (2007a). The causes of piping in a set of abandoned agricultural terraces in Southeast Spain. *Catena*, 69: 282-293.
- ROMERO DÍAZ, M.A., MARÍN SANLEANDRO, O., SÁNCHEZ SORIANO, A., (2007b). Surfaces of gullies generated by piping processes in abandoned fields (South-east Spain). En: *IV International symposium on gully erosion* (Casalí, J., Giménez, R., Eds.) Universidad Pública de Navarra, pp. 106-108, Pamplona.
- ROMERO DÍAZ, M.A., MARÍN SANLEANDRO, O., SÁNCHEZ SORIANO, A., (2009). Procesos de piping en la región de Murcia. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (1): 87-117.
- SHERARD, J.L., DUNNINGAN, L., DECKER, R., STEELE, F., (1976a). Pinhole Test for identifying Dispersive Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 102, Paper 11846: 69-85.
- SHERARD, J.L., DUNNINGAN, L., DECKER, R., (1976b). Identification and nature of dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, Vol. 102: 287-301.
- TERNAN, J.L., ELMES, A., FITZJOHN, C., WILLIAMS, A.G., (1998). Piping susceptibility and the role of hydrogeomorphic controls in pipe development in alluvial sediments, Central Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 42 (1): 75-87.
- TORRI, D., BORSELLI, L., CALZOLARI, C., YANEZ, M.S., SALVADOR SANCHIS, M.P., (2002). Soil erosion, land use, soil qualities and soil functions: effect of erosion. En: *Man and Soil at the Third Millennium*, Vol. I (Rubio, J.L., Morgan, R.P.C., Asins, S., Andreu, V., Eds.). Geoforma, pp. 131-148, Logroño.
- VERACHTERT, E., VAN DEN EECKHAUT, M., POESEN, J., DECKERS, J., (2010). Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium. *Geomorphology*, 118 (3-4): 339-348.