



HIDROFOBIA EN SUELOS MEDITERRÁNEOS SEMIÁRIDOS: IMPLICACIONES HIDROLÓGICAS PARA UNA PEQUEÑA CUENCA EXPERIMENTAL EN EL SE IBÉRICO

*Hydrofobicity phenomena in semi-arid Mediterranean soils: hydrological implications
for an experimental small catchment in SE Spain*

S. Contreras López⁽¹⁾ y A. Solé-Benet⁽²⁾

Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC, General Segura, 1. 04001 Almería

(1) sergio@eeza.csic.es

(2) albert@eeza.csic.es

Resumen: Las elevadas heterogeneidades de los regímenes de precipitación y de las propiedades edáficas que caracterizan a los ambientes semiáridos propician la aparición de complejos teselares de vegetación que pueden llegar a tener repercusiones hidro-geomorfológicas a diferentes escalas. A su vez el fenómeno de hidrofobia puede adquirir una gran relevancia en estos ambientes siendo la vegetación la principal fuente de aporte de compuestos hidrofóbicos. El presente trabajo pone de manifiesto la existencia de suelos hidrofóbicos en un ambiente semiárido del SE ibérico, así como el papel que desempeñan la vegetación, la textura del suelo y las letrinas de conejos en la aparición del fenómeno. Para demostrarlo se ha realizado una aproximación a diferentes escalas (medidas de hidrofobia puntual, simulaciones de lluvia en parcelas de 0.24 m² y medidas de escorrentía bajo condiciones de lluvia naturales en parcelas de 20 m²). Se discuten las repercusiones que la repelencia puede tener a escala de cuenca y las implicaciones en los flujos hídricos y dinámica de sedimentos.

Palabras clave: hidrofobia, escorrentía, infiltración, distribución espacial.

Abstract: Semiarid environments are characterised by the high variability of rainfall and the spatial heterogeneity of soil surface properties. These conditions favour the formation of sparse vegetation mosaics constituted by cells of plant patches and bare ground, that behave like sources and sinks of water and sediment fluxes. In turn, in these environments, the hydrofobicity phenomena may reach a great relevance, being the vegetation the main source of hydrophobic compounds. The present work shows the existence of water repellent soils in a semiarid environment in SE Spain and studies the role played by the vegetation, the soil properties and the latrines of rabbits in soil hydrophobicity generation. To demonstrate it, an approach at different scales (point hydrophobicity measurements, rain simulations in 0.24 m² plots and runoff data from 20 m² plots in natural rainfall events) has been carried out. The impacts of hydrophobicity at hillslope and catchment scale as well as the implications in the hydrological responses are discussed.

Keywords: hydrophobicity, runoff, infiltration, spatial distribution.



Contreras López, S. y Solé Benet, A. Hidrofobia en suelos mediterráneos semiáridos: implicaciones hidrológicas para una pequeña cuenca experimental en el SE ibérico. *Rev. C. & G.*, 17 (1-2), 29-45.

1. Introducción

Las regiones áridas y semiáridas se caracterizan por la elevada variabilidad espacial y temporal

de las precipitaciones (Slatyer y Mabbut, 1964) y por la gran heterogeneidad de algunas variables del terreno como capacidad de infiltración, disponibilidad de sedimentos y rugosidad (Puigdefábregas

et al., 1999). Estos condicionantes ambientales propician la aparición de un complejo teselar poliédrico caracterizado por porciones de terreno o "células" espacialmente discontinuas con unos comportamientos hidro-geomorfodinámicos muy diferentes (Pickup y Chewings, 1986) que lo convierten en elementos "fuente-sumidero" de la escorrentía superficial y la distribución de sedimentos.

Los patrones de heterogeneidad pueden observarse a diferentes escalas y, por tanto, en cada una de ellas, los procesos que caracterizan el intercambio de agua y sedimentos entre fuentes y sumideros difieren. A escala de parcela, por ejemplo, la vegetación se alza como uno de los principales factores que contribuyen a esta variabilidad espacial ya que condiciona los lugares de infiltración y sedimentación (Puigdefábregas y Sánchez, 1996) e induce cambios en las propiedades del suelo y en la propia vegetación (Puigdefábregas et al., 1996; Pugnaire et al., 1996b; Moro et al., 1997a; Puigdefábregas et al., 1999). Sin embargo, a escala de ladera, para la comprensión del funcionamiento del sistema, adquieren mayor importancia los condicionantes litológicos y topográficos ya que éstos controlan la distribución de los cauces primarios que son los elementos que conectan fuentes y sumideros (Yair y Lavee, 1985; Puigdefábregas et al., 1999).

Por otro lado, recientes estudios han puesto de manifiesto que los fenómenos de hidrofobia, o repelencia al agua, en suelos pueden ser la regla más que la excepción (Wallis y Horne, 1992; Dekker y Ritsema, 1996) siendo los territorios generalmente secos los más susceptibles de sufrir sus efectos, aunque no es una propiedad restringida exclusivamente a ellos (Doerr et al., 2000). Existen suelos muy resistentes a la humectación, lo cual tiene unas implicaciones hidrológicas y geomorfológicas que pueden alcanzar una gran relevancia.

La hidrofobia en el suelo es un fenómeno ampliamente descrito por diversos autores en diferentes regiones y bajo condiciones climáticas y edáficas diversas (Wallis y Horne, 1992; DeBano, 2000; Jaramillo et al., 2000). Los factores que determinan su aparición pueden dividirse en: a) factores biológicos y b) factores no biológicos (Doerr et al., 2000). Entre los primeros destaca la influencia directa de la vegetación, la

biota fúngica y microbiana y el contenido en materia orgánica y humus. El papel que juega la macrofauna en la contribución al fenómeno ha sido poco estudiada (Cammeraat et al., 2002). Los factores no biológicos están relacionados principalmente con la textura, especialmente con muy bajos contenidos en arcilla, así como con la temperatura y humedad del suelo. Los efectos del fuego (Imeson et al., 1992) y de la humedad edáfica (Ritsema et al., 1998; Doerr y Thomas, 2000) son bien conocidos: la hidrofobia aumenta notablemente cuando el suelo ha sido sometido a elevadas temperaturas y/o a prolongados períodos de sequía.

Entre los diversos impactos geomorfológicos e hidrológicos asociados a la hidrofobia caben destacar (Scott et al., 1998; DeBano, 2000; Doerr et al., 2000; Shakesby et al., 2000): a) reducción de la infiltración e incremento de la escorrentía; b) desarrollo de vías preferenciales de infiltración y percolación de agua; c) efectos sobre el régimen de humedad del suelo y propiedades físicas; d) contribución hídrica a cauces y; e) fomento de los procesos erosivos.

Si bien la existencia de una cubierta vegetal influye en mayor o menor grado en el contenido de materia orgánica del suelo, no existe una relación clara entre ésta y el grado de hidrofobia (Doerr et al., 2000). Se ha destacado la importancia que adquieren los procesos de humificación y degradación de los restos vegetales, los cuales son función de las condiciones ambientales del entorno así como del tiempo de permanencia de la materia fresca bajo la copa. Observaciones realizadas en regiones semiáridas de California (Teramura, 1980) subrayaron el destacado papel que puede adquirir la edad de la vegetación en el grado de hidrofobia.

En este trabajo se lleva a cabo una evaluación de la hidrofobia (distribución e intensidad) en suelos sobre micasquitos del sureste peninsular semiárido y de los posibles factores que propician su aparición (tipo, tamaño y edad de la vegetación, características edáficas e influencia de macrofauna) y que confirmen observaciones obtenidas en estudios previos (Nicolau et al., 1996; Puigdefábregas et al., 1999), todo ello como ejemplo de un fenómeno mucho más frecuente de lo que parece y de importantes consecuencias hidrológicas y geomorfológicas.

2. Área de estudio

2.1. Localización

La zona de estudio (UTM 05555 4109) se ubica en el margen derecho de Rambla Honda, cauce principal de una cuenca de 30.6 km² en la vertiente sur de la Sierra de los Filabres en la provincia de Almería. La región (Fig. 1) se encuadra bajo un clima semiárido con una temperatura media anual de 16° C y una precipitación anual media de 300 mm concentrada principalmente en invierno (Puigdefábregas et al., 1996). Los veranos son largos y muy calurosos pudiéndose alcanzar temperaturas a ras de suelo de casi 60° C. Se distingue una catena de suelo y vegetación a lo largo de la ladera. En el sector somital aflora la roca madre, micasquistos grafitosos con granates del complejo Nevado-Filábride (Devónico-Carbonífero) con macollas de esparto (*Stipa tena-cissima*) sobre suelos de tipo Leptosol eútrico. En el sector central y parte apical del abanico aluvial, aparecen suelos de origen coluvial (Regosoles eútricos) cubiertos por matas de albaída (*Anthyllis*

cytisoides), mientras que en el sector basal del abanico, la cubierta vegetal está dominada por arbustos de retama (*Retama sphaerocarpa*) observándose una transición edáfica desde Regosoles eútricos hasta Fluvisoles eútricos en las zonas próximas al cauce de la rambla (Fig. 2).

Los suelos de los sectores medios y bajos de las laderas son esencialmente arenoso-francos, con contenidos en arcilla que llegan a ser inferiores al 2% y moderadamente alcalinos con bajas concentraciones de CaCO₃, desde los 4.4 g kg⁻¹ en los horizontes C hasta los 9.1 g kg⁻¹ en los horizontes superficiales. La capacidad de intercambio catiónico es baja a consecuencia de la escasez de materia orgánica y arcilla.

La investigación se ha centrado en un área representativa de los sectores de pie-de-monte de dicha sierra, dominados esencialmente por comunidades de retama y albaída dispersas.

2.2. Diferenciación textural

En los suelos de origen coluvial de los abanicos se ha descrito una importante diferenciación textural

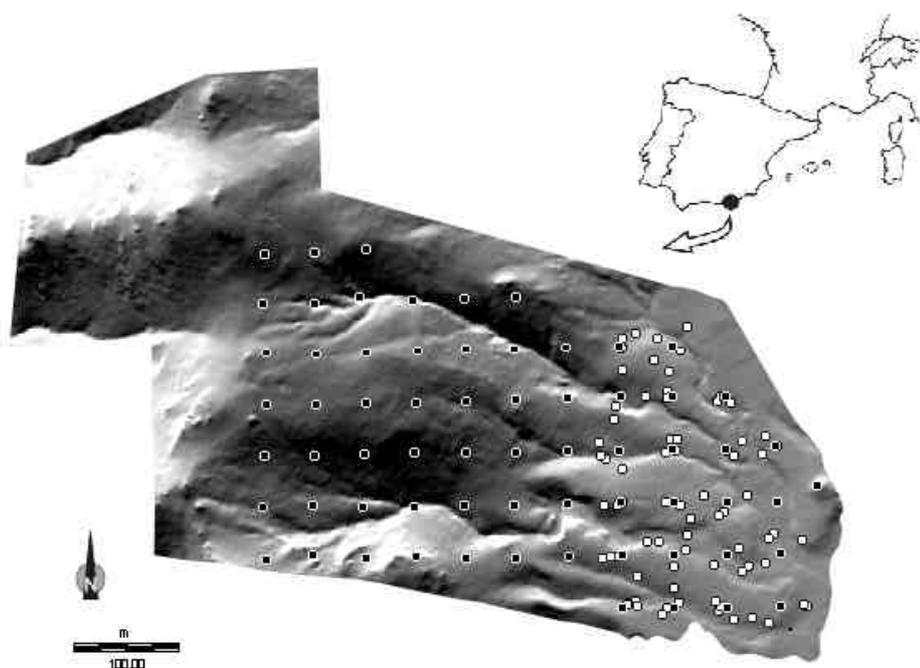


Figura 1. Mapa de localización de Rambla Honda y área de estudio. Red ortogonal de estacas georreferenciadas y ubicación de los puntos de muestreo.

Figure 1. Rambla Honda location and field site map. Geodetic network and sampling scheme.



Figura 2. Mosaico de vegetación dispersa en el sector de transición entre Anthyllis y Retama.
Figure 2. Mosaic of sparse vegetation at the transitional sector between Anthyllis and Retama.

en los primeros centímetros del perfil del suelo (Puigdefábregas et al., 1996; 1999), conocida como *sieving crust* (Valentin y Bresson, 1992), que se traduce literalmente como costra filtrante. Se trata de un tipo de costra estructural (Fig. 3) que se forma por un proceso combinado de salpicadura y escorrentía, y que resulta en una grano-clasificación de los primeros centímetros del suelo, en la que pueden diferenciarse tres capas que, desde la más superficial a la más profunda, denominamos: 1) capa A: formada por un pavimento de grava fina (diámetro de 5 a 20 mm) de micaesquistos y algo de cuarzo, hasta 1 cm de espesor; 2) capa B: horizonte de lavado de 5 a 20 mm de espesor, de gravas finas y arena gruesa (diámetro de 0.5 a 5 mm) y una baja proporción de partículas finas; se encuentra mucho más desarrollado en los rodales de claros que bajo las matas, donde las partículas de arena se mezclan con agregados órgano-minerales; 3) capa C: de 2 a 10 mm de espesor, muy compactada y caracterizada por una concentración de finos, mayoritariamente arena muy fina (0.2 a 0.05 mm de diámetro); ocasionalmente esta capa está atravesada por grietas verticales o subverticales

y por finas raíces. Cuando las capas A y B son eliminadas por efecto de la erosión, se forma un encostramiento en la capa C que en periodos húmedos puede ser cubierto por musgo. En rodales bajo mata esta capa puede ser identificada pero la diferenciación textural es menos pronunciada que en las zonas desnudas. Las consecuencias hidrológicas de esta diferenciación textural se explican en Puigdefábregas et al. (1999) y Solé-Benet et al. (2002).

2.3. Patrones de distribución de la vegetación

Los mosaicos de vegetación dispersa suelen ser comunes en áreas con predominio de clima semiárido. Esta distribución responde a mecanismos de adaptación a los condicionantes climáticos y edáficos locales (Puigdefábregas et al., 1999). En ocasiones, las importantes limitaciones hídricas asociadas a estos ambientes se ha interpretado como el principal desencadenante de la elevada heterogeneidad espacial de las unidades de vegetación y claros que caracterizan estos complejos teselares (Specht, 1972; Eagleson y Segarra, 1985). En

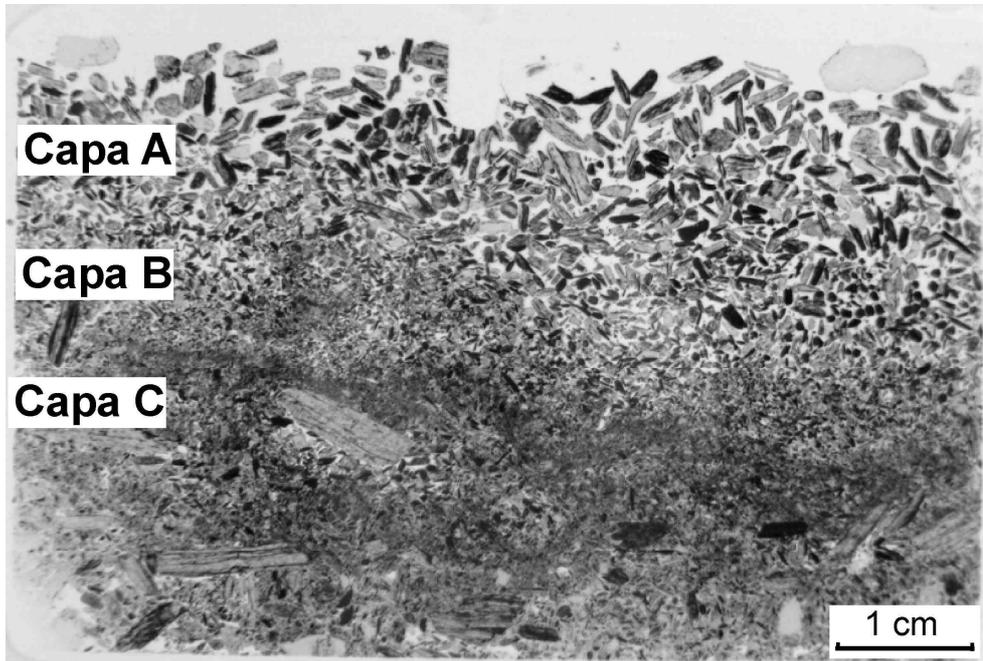


Figura 3. Diferenciación textural en los estratos superficiales de los suelos de Rambla Honda.
 Figure 3. Layer differentiation in the soil surface horizon of Rambla Honda.

Rambla Honda se han descrito dichos patrones de vegetación dispersa (Puigdefábregas et al., 1996; Puigdefábregas et al., 1999), más patentes en los sectores basales de la catena con predominio de retama (Fig. 2). Las implicaciones geomorfológicas han sido ampliamente descritas por Puigdefábregas y Sánchez (1996) para el sector apical con predominio de esparto. Los procesos que refuerzan dicha diferenciación espacial así como las implicaciones que traen consigo pueden ser extrapoladas al resto de la catena (Puigdefábregas et al., 1999).

2.4. La actividad de las hormigas en Rambla Honda

Cammeraat et al. (2002) han puesto de manifiesto la importancia que puede adquirir la actividad de las hormigas en los procesos de infiltración-escorrentía en dicha área de estudio. La actividad de estas especies está centrada en las áreas de transición entre matorrales y tiene efectos importantes sobre la fertilidad, patrones de infiltración, propiedades estructurales de los suelos y fenómenos de hidrofobia. Por ejemplo, en los montículos de sedimentos alrededor de las entradas a los hormigueros,

se han medido concentraciones de macronutrientes (N, P) y carbón orgánico entre 2 y 8 veces más altos que en las áreas control no afectadas. Este mayor contenido en materia orgánica y nutrientes fomenta la actividad microbiana en las primeras capas superficiales del suelo, la cual puede ser fuente de compuestos hidrofóbicos (Doerr et al., 2000). Las curvas de escorrentía obtenidas por Cammeraat et al. (2002) a partir de simulaciones de lluvia a diferentes intensidades, así como la mayor heterogeneidad de los frentes de infiltración asociados a las áreas de máxima influencia de hormigas, demuestran cómo éstas fomentan la repelencia. En última instancia, a escala de ladera y siguiendo el esquema de elementos fuente-sumidero, el comportamiento que adquieren estas áreas difiere según la humedad antecedente del suelo, la estacionalidad que caracteriza a los fenómenos de hidrofobia y la intensidad de los eventos lluviosos.

2.5. Influencia de los conejos

Los herbívoros desempeñan una importante función en el ciclo y distribución de los nutrientes (Gist y Sferra, 1978). Diversos estudios han cons-

tatado que las letrinas de conejos tienen un importante impacto en las propiedades físicas y químicas del suelo, propiciando un incremento en los índices de fertilidad (Hamblen et al., 1995; Willot et al., 2000; Petterson, 2001). Además, en regiones semiáridas, donde la materia orgánica es la principal fuente de nutrientes que requieren las plantas para su crecimiento (Powell et al., 1994), las letrinas aportan una gran cantidad de materia orgánica además de nitrógeno, fósforo, magnesio y potasio (Petterson, 2001).

En Rambla Honda las letrinas tienen un tamaño medio de $0.86 \pm 0.08 \text{ m}^2$ (Willot et al., 2000). Petterson (2001) ha medido una densidad de 109 letrinas/hectárea y considerando que el área de influencia no se restringe únicamente al tamaño de la letrina sino que puede extenderse al menos medio metro más allá, el área afectada podría llegar a representar hasta el 4% de Rambla Honda.

Los elevados contenidos en materia orgánica y las bajas densidades aparentes de los suelos afectados por las letrinas, favorecen la aparición del fenómeno de hidrofobia tal y como se demuestra en el presente estudio.

3. Metodología

El estudio se ha estructurado en cuatro bloques: a) revisión bibliográfica; b) observaciones de campo, caracterización del terreno y muestreo; c) test de hidrofobia en laboratorio y; d) tratamiento estadístico de resultados.

Para demostrar el fenómeno de hidrofobia en el área de estudio se realizaron observaciones y pruebas de hidrofobia en campo y en laboratorio. Teniendo en cuenta que la mayor incidencia del fenómeno se produce después de un período de sequía, el estudio se inició en septiembre del 2001, tras el periodo estival.

Las observaciones permitieron determinar diferentes patrones de humectación tanto en la superficie como en perfiles de suelo después de lluvias naturales. Las diferencias fueron recogidas en un amplio catálogo fotográfico del que las figuras 4, 8 y 13 constituyen un buen ejemplo.

Para el análisis de la hidrofobia en laboratorio se aplicó el método del WDPT (*Water Drop Penetration Time*) descrito por diversos autores (Van't Woudt, 1959; Krammes y DeBano, 1965;



Figura 4. "Anillo de repelencia" asociado a un arbusto de Retama justo después de una lluvia. Las partes claras de la superficie del suelo son hidrofóbicas y contrastan con las oscuras, más mojadas (foto: Contreras López).

Figure 4. "Hydrophobic ring" associated with a Retama bush after a rainfall event. Soil surface with light areas are hydrophobic, while dark ones are better wetted (photo: Contreras López).

Letey et al., 1975; King, 1981; Josa March, 1994; Doerr et al., 1996; Ritsema et al., 1998; WRSPR, 1999; Gerke et al., 2001). La prueba consiste en medir el tiempo que tarda en penetrar una gota de agua colocada en la superficie de una muestra de suelo. Generalmente se emplea el tiempo medio de penetración de varias gotas. El que las gotas permanezcan en la superficie es indicativo de que el ángulo de contacto es superior a 90° (Watson y Letey, 1970; Letey et al., 2000; Bauters et al., 2000), es decir que las fuerzas de cohesión (tensión superficial) entre las diferentes moléculas de agua de la gota son superiores a las fuerzas de adhesión entre las moléculas de agua y las partículas minerales y orgánicas del suelo (Doerr et al., 2000). Se trata de una medida de la persistencia o estabilidad de la repelencia y no necesariamente un índice del ángulo de contacto (Dekker y Ritsema, 1994; Letey et al., 2000).

Se diferencia entre *repelencia potencial*, cuando el test se realiza sobre muestras secadas previamente en la estufa, y *repelencia real*, cuando la medida se hace en el campo en condiciones de humedad real (Dekker y Ritsema, 1994).

Antes de la campaña de muestreo general se determinó la incidencia del fenómeno a diferentes profundidades. Para ello se realizó un muestreo preliminar aleatorio sobre un área de 0.75 has. los días 24-9-2001 y 15-10-2001 donde se tomaron 14 (de H1 a H14) y 12 (R1 bis a R12 bis) muestras de suelo a 3 y 10 cm respectivamente.

Las pruebas de hidrofobia en campo así como los resultados obtenidos por el estudio preliminar sugerían que el fenómeno de repelencia quedaba muy localizado en los primeros centímetros del perfil de suelo, tanto por la mayor concentración de materia orgánica, como por efecto de la capa C de la costra filtrante. Por tanto, para la campaña de muestreo general se retiró el pavimento de piedras (capa A de la costra filtrante) y el mantillo (cuando existía) y se procedió a muestrear la porción de suelo comprendida entre dicho pavimento y la capa de C de la costra. La campaña estuvo repartida en 5 jornadas de campo (19, 23, 26 y 31 de octubre y 3 de noviembre) recogiendo un total de 84 muestras. Entre el muestreo preliminar y el general tuvieron lugar dos eventos lluviosos (de 12 y 19 mm respectivamente) que produjeron coeficientes de escorrentía de la misma magnitud en parcelas cerradas de 20 m²: entre 0,03 y 0,1. Dado el carác-

ter temporal de la hidrofobia, las anteriores precipitaciones podrían considerarse como causantes de cierta disminución en la magnitud de la hidrofobia en nuestro estudio. Sin embargo, un evento posterior al muestreo general demuestra que la hidrofobia real sigue siendo importante (ver Figs. 4, 8, 13 y comentario en 3.1).

Para el muestreo al azar se utilizaron 84 pares de números aleatorios que representaban coordenadas polares (distancia, de 0 a 25 m, y dirección, de 0 a 360°). Los puntos fueron agrupados en grupos de cuatro y se repartieron entre las 21 estacas de georreferenciación que formaban el esqueleto del área de estudio. Estas estacas son parte integrante del sistema de georreferenciación de Rambla Honda constituido por una red ortogonal de 66 estacas separadas 50 m entre sí (Fig. 1). Se descartó el muestreo en parcelas experimentales cerradas, en lugares de difícil acceso, o en aquellos influidos por el paso de vehículos.

A cada muestra se le asignó una ficha donde se inventariaron diferentes variables relativas a localización, influencia de vegetación y características de la superficie (tabla 1). Las muestras se llevaron al laboratorio y se tamizaron a 2 mm. En cápsulas de porcelana se secaron en la estufa a 60° C durante 48 horas unos 200-250 g de cada muestra. Tras el secado, se dejaron durante otras 48 horas a temperatura y humedad ambiente (25° C, 45%) antes de proceder a los test WDPT. Para ello se colocaron unos 30-40 g de suelo en placas Petri y se calculó el tiempo medio de penetración de 7 gotas de agua destilada (0.02 g) colocadas en la superficie de la muestra mediante una pequeña pipeta de plástico (Fig. 5). Los tiempos de las siete gotas nos permiten realizar un análisis de la variabilidad intramuestra (Doerr et al., 1998; Gerke et al., 2001).

También se realizó un tratamiento estadístico para determinar qué variables tenían mayor repercusión en la existencia o ausencia de hidrofobia. La caracterización de las variables se realizó de forma cualitativa y los valores de repelencia para cada muestra se codificaron como 1 y 0 en función de la existencia o no de hidrofobia. La elaboración de una tabla de contingencia permitió posteriormente ajustar el conjunto de datos a una ecuación de distribución logística donde la variable independiente es la hidrofobia y el resto de variables inventariadas en campo son las variables dependientes.

Tabla 1. Variables de campo inventariadas para cada muestra de suelo.
 Table 1. Field variables monitored for every soil sample.

Influencia de la vegetación perenne	
RET	Influencia de <i>Retama sphaerocarpa</i>
ANT	Influencia de <i>Anthyllis cytisoides</i>
ART	Influencia de <i>Artemisia barrelieri</i>
En caso de existir influencia, se tomaba los datos relativos a tamaño y edad de la planta	
Características superficiales	
CL	Localización en suelo desnudo
PT	Presencia pasto terofítico
MAN	Mantillo vegetal
GRAV	Desarrollo de un pavimento de piedras en superficie
COST	Existencia de la capa C de la costra tamiz (integrada por arena fina y muy fina)
RAMB	Ubicación en cauce de rambla
DREN	Canal de drenaje
REM	Remoción animal
LET	Influencia de letrina de conejo
ISLAFERT	Existencia de isla de fertilidad bajo la copa

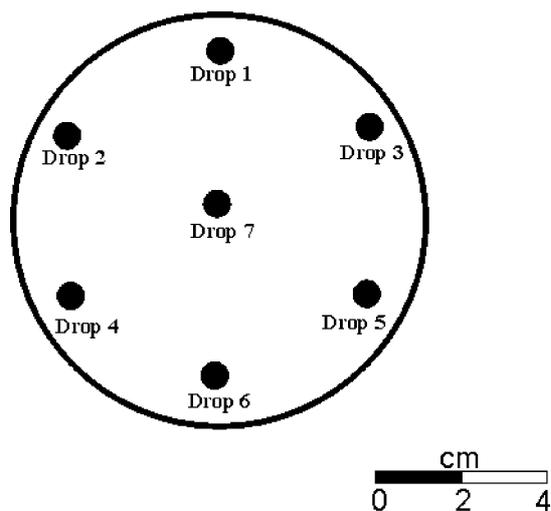


Figura 5. Posición de las gotas de agua destilada en las placas Petri durante el desarrollo de los test de hidrofobia.
 Figure 5. Position of the distilled water drops on the Petri dishes in the WDPT test.

3.1. Frentes de infiltración e incidencia de la macrofauna

Para determinar la influencia de las letrinas de conejos en la hidrofobia del suelo se llevaron a cabo observaciones de campo tras un evento lluvioso (9-11-2001) de 18.48 mm y una intensidad 14 mm h⁻¹. Se abrió una calicata de 2.5 m x 0.4 m

atravesando una letrina de conejos de gran tamaño. Posteriormente se delimitaron los frentes de humectación y se midió en superficie y a lo largo de la línea de apertura de la calicata (proyección de los primeros centímetros del perfil) la repelencia real (Dekker y Ritsema, 1994).

En la misma jornada se procedió al fotografiado de diferentes frentes de humectación a lo largo de paredes verticales generalmente asociadas a cauces o deslizamientos.

4. Resultados

4.1. Observaciones y pruebas de campo

Las más de 100 test realizados in situ reflejan una gran variabilidad espacial en los valores de hidrofobia real. Se observó la existencia de diferencias significativas (en algunos casos de extrema a ligera, usando la clasificación de DeBano) en función de que se retirase o no la capa B de la costra filtrante (Fig. 3). Se observó como esta capa de arena micácea iba asociada a un polvillo de naturaleza orgánica, posiblemente responsable del fenómeno. Se obtuvieron valores de repelencia extrema a los pies de arbustos de retama observándose una disminución de éstos al alejarse del área de influencia de la copa (Fig. 4).

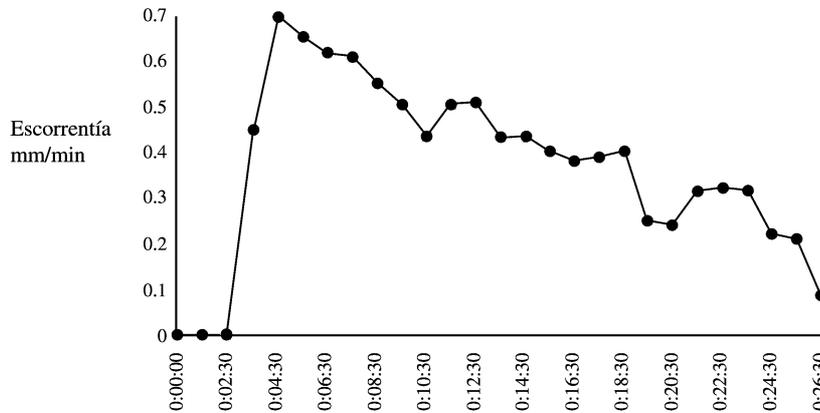


Figura 6. Hidrográfico de escorrentía en prueba de simulación de lluvia bajo la copa de una retama. Un incremento en la escorrentía es seguido por una reducción como consecuencia de la hidrofobia inicial asociada al mantillo (de Nicolau et al., 1996).

Figure 6. Hydrograph from rainfall simulation over a Retama bush; an early runoff increase is followed by runoff reduction with time, due to initial hydrophobicity of the dry litter (from Nicolau et al., 1996).

4.1.1. Consecuencias hidrológicas y variabilidad temporal de la hidrofobia

La existencia de fenómenos de hidrofobia quedan reflejados en las curvas de infiltración-escorrentía (DeBano, 1981; Imeson et al., 1992). Por norma general, la hidrofobia provoca que la velocidad de infiltración sea pequeña al inicio de la precipitación aumentando progresivamente hasta llegar a un valor máximo cuando el comportamiento hidrofóbico desaparece, a partir del cual la infiltración decrece con tendencia a hacerse asintótica a lo largo del tiempo como consecuencia de la saturación de los horizontes superficiales. Este comportamiento se observó en experimentos de simulación de lluvia en la misma área de estudio (Fig. 6) (Nicolau et al., 1996; Puigdefábregas et al., 1999; Cammeraat et al., 2002) así como en sistemas de dehesa de Extremadura (Cerdá et al., 1998). En parcelas de erosión-escorrentía aparecen curvas similares (Fig. 7).

Asimismo en parcelas instrumentadas de escorrentía-erosión de 2 x 10 m y monitorizadas durante más de cinco años en la misma área de estudio, se ha demostrado que las mayores tasas de escorrentía son más pronunciadas después de prolongados periodos de sequía, cuando la repelencia se acentúa y por tanto la capacidad de infiltración es menor, como han encontrado otros autores (Burch et al., 1989; Imeson et al., 1992). Precipitaciones similares en magnitud e intensidad tienen un comportamiento diferente según la época del año: así, los eventos de 23-09-1995 (primeras lluvias de la tem-

porada) y 31-01-1996 (en plena época de lluvias), tienen intervalos de tiempo hasta la escorrentía muy diferentes, triplicándose este tiempo para el segundo evento (tabla 2). Otros autores ya habían demostrado como en periodos húmedos los suelos pierden hidrofobia, la cual puede llegar a recuperarse tras un periodo de altas temperaturas y escaso aporte de agua (Walsh et al., 1994; Doerr y Thomas, 2000) tal y como se puede deducir tras el estudio detallado del evento de 09-09-1996. También se ha sugerido que el restablecimiento completo del fenómeno requiere de un cierto tiempo en donde es imprescindible un nuevo aporte de sustancias hidrofóbicas (Doerr y Thomas, 2000), como se comprueba en el evento de 29-04-1996 (tabla 2).

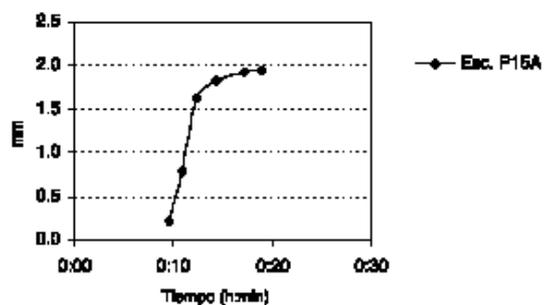


Figura 7. Hidrográfico de escorrentía del 23/09/95 en la parcela 15B. Precipitación total = 9.31mm; I_5 max = 56.16 mm h⁻¹; Coeficiente de escorrentía = 20%; Tiempo hasta la escorrentía = 9 min.

Figure 7. Hydrograph from plot 15B during the event 23/09/95. Total rainfall = 9.31 mm; I_5 max = 56.6 mm h⁻¹; Runoff coefficient = 20%; Time to runoff = 9 min.

Tabla 2. Impacto de la hidrofobia en la escorrentía (ejemplo en la parcela de escorrentía 15A): la lluvia de septiembre (primera fila) produce escorrentía en mucho menor tiempo que las demás lluvias acaecidas en períodos más húmedos. Humedad del suelo a 5 cm.

Table 2. Hydrological impact of hydrofobicity (example from plot 15A): September rainfall has a shorter time to runoff than other rainfall events from wetter seasons. Soil moisture at 5 cm depth.

Fecha	Lluvia, mm	i_5 max	Humedad volumétrica, %	Tiempo de escorrentía
23/09/95	9.31	11	2.8	12'27"
31/01/96	13.13	13.8	16.1	39'31"
29/04/96	4.42	16.8	7.4	18'41"
09/09/96	8.89	24.8	2.8	16'09"

4.1.2. Frentes de infiltración

La repelencia también se ha descrito como un factor causante de flujos preferenciales de agua dando lugar a patrones de infiltración irregulares (Jamison, 1945; Gilmour, 1968; Ritsema et al., 1998; Dekker y Ritsema, 2000) que afectan al crecimiento de las plantas (Dekker y Ritsema, 1994) e incrementan el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por la mayor velocidad de transporte del agua y los solutos (Bauters et al., 2000). También se ha observado que la repelencia es una propiedad que reduce las tasas de evaporación (Bachman et al., 2001a) lo cual a su vez tiene importantes efectos en las propiedades térmicas

del suelo (Bachman et al., 2001b). En Rambla Honda se han observado estos patrones de humectación irregular y frentes de infiltración asociados (Fig. 8).

4.2. Test de hidrofobia en laboratorio

En la tabla 3 se presentan los resultados de la variabilidad intra-muestra, que es considerable, habiéndose obtenido coeficientes de variación alrededor del 30%, independientemente del punto de muestreo. Este hecho sugiere que el tamizado previo no homogeniza suficientemente las muestras de campo.



Figura 8. Lengüas de infiltración, en tonos más oscuros, asociados a fenómenos de hidrofobia en un corte de terraza de rambla (foto: Contreras López).

Figure 8. Preferential flow paths, in darker tones, due to hydrofobicity phenomena in a trench across a terrace near the ephemeral river.

Tabla 3. Variabilidad intra-muestra. CV= coeficiente de variación.
 Table 3. Intra-sample variability. CV = coefficient of variation.

	TOTAL		RET		CL		PT		MAN	
	WDPT	C.V.	WDPT	C.V.	WDPT	C.V.	WDPT	C.V.	WDPT	C.V.
Min	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	6,18
Max	3634	63,31	3634	52,70	2918	63,31	3366	63,31	3634	52,70
Med	247	27,44	295	27,50	181	27,94	302	29,26	567	30,34
n	84		22		47		44		30	

Tabla 4. Clases de hidrofobia. A, según DeBano (1981); B, según clasificación propuesta para Rambla Honda.
 Table 4. Hydrofobicity classes. A, according DeBano (1981); B, proposed hydrofobicity classification for Rambla Honda.

A. Clases de repelencia	WDPT(s)	B. Clases de repelencia
Ausente	< 5	Ausente
Débil	5 - 60	Débil
Moderada	60-300	Moderada
	300-600	Moderada
Extrema	600-3600	Severa
	> 3600	Extrema

Al principio de este estudio se adoptó la clasificación propuesta por DeBano (1981) (tabla 4) y seguida por otros autores (Ritsema et al., 1998; Jaramillo, 2000). Sin embargo, el análisis de los resultados obtenidos en las 84 muestras recogidas en campo (Figs. 9 y 10) sugiere la necesidad de establecer una nueva clasificación más acorde con los condicionantes del entorno (tabla 4). Siguiendo a Walsh et al. (1994) se ha considerado un tiempo de 60 s como umbral para discernir cuando un suelo es o no repelente en lugar de 5 s tal y como proponen otros autores (Krammes y DeBano, 1965; DeBano, 1981).

La aplicación del modelo de regresión logística (tabla 5) determina cómo cada variable contribuye o no a la aparición del fenómeno de hidrofobia. La ecuación a la que responde el modelo es:

$$R(x) = \frac{e^{f(x)}}{1 + e^{f(x)}}$$

donde

$$f(x) = -7.985 - 0.661 * RET - 1.6 * ANT + 11.234 * ART - 2.062 * CL - 0.44 * PT - 3.733 * MAN + 1.599 * GRAV + 1.264 * COST + 4.638 * DREN - 1.817 * REM - 2.202 * LET - 0.928 * ISLAFERT$$

Los resultados muestran que las únicas variables relacionadas de forma significativa con la hidrofobia del suelo son a) existencia de mantillo y b) ubicación en el lecho de un cauce. Además de las mencionadas, otras variables estadísticamente significativas que aparecen cuando se considera la clasificación de DeBano (1981) son: c) pedregosidad superficial (correlación negativa) y d) letrina de conejos.

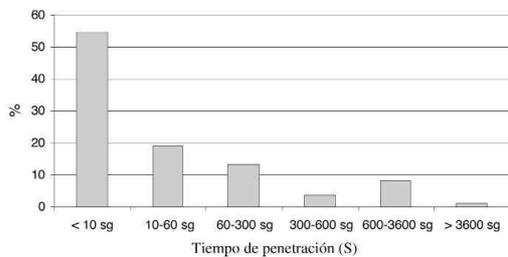


Figura 9. Distribución porcentual del test WDPT en las muestras secadas de Rambla Honda.

Figure 9. Relative frequency of the WDPT test on dried samples of the Rambla Honda site.

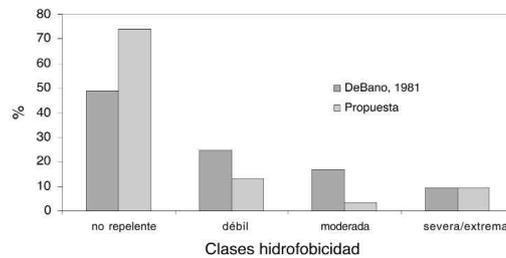


Figura 10. Distribución por clases de hidrofobia según a) la clasificación de DeBano (1981) y b) propuesta.

Figure 10. Frequency of WDPT values according to a) DeBano and b) proposed classification.

Tabla 5. Modelo de regresión logística para determinar la existencia de hidrofobia según la clasificación propuesta y las variables de campo inventariadas. En negrita las variables con significancia estadística.

Table 5. Logistic regression model to determine the existence of hydrophobicity according the proposed classification and the monitored field variables. In bold, variables with statistical significance.

Variable	Coef. estimado	Desviación estándar	Odds Ratio estimado	χ^2	p
RET	-0,661	3,080	0,516	0,048	0,827
ANT	-1,600	2,006	0,202	0,606	0,436
ART	11,234	170,756	75648,100	0,795	0,373
CL	-2,062	2,189	0,127	0,910	0,340
PT	-0,440	1,101	0,644	0,161	0,688
MAN	-3,733	1,348	0,024	10,704	0,001
GRAV	1,599	1,067	4,948	2,403	0,121
COST	1,264	1,131	3,541	1,342	0,247
RAMB	4,638	2,064	103,331	6,838	0,009
DREN	-1,314	1,342	0,269	1,073	0,300
REM	-1,817	1,748	0,162	1,077	0,300
LET	-2,202	1,411	0,111	2,605	0,107
ISLAFERT	-0,928	2,772	0,395	0,117	0,732
Constante	-7,985	170,849			
Desviación total		96,607			
% desv. explicada por el modelo		52,063			
% ajustado		23,079			

Si se tiene en cuenta la ubicación de las muestras (bajo mata o en claros), no hay hidrofobia en más del 80% de las muestras en claro. Bajo mata la heterogeneidad en los resultados es mayor (Fig. 11). Para el cálculo de dichos porcentajes no se han considerado las muestras situadas en claro con una cobertura de pasto terofítico muy elevada y con un importante espesor de mantillo.

Atendiendo al tipo de vegetación, el 54% de las muestras recogidas bajo influencia de *Retama*

sphaerocarpa muestran tiempos de retención superiores a 60 s. La edad de las matas también es una variable que puede determinar el grado de repelencia ya sea directa o indirectamente (Fig.12). Siguiendo la clasificación propuesta por DeBano (1981), el 87% de las pruebas realizadas en muestras recogidas en islas de fertilidad asociadas a esta especie y con espesores de mantillo superiores a 1 cm muestran algún grado de hidrofobia. Si consideramos la clasificación propuesta para Rambla Honda, el porcentaje se reduce al 50%.

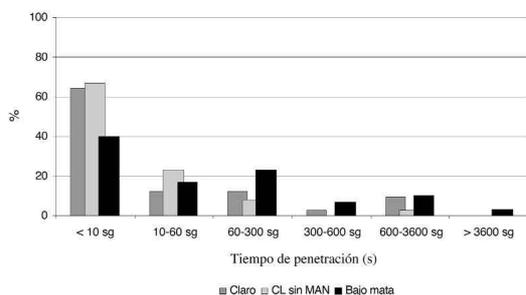


Figura 11. Hidrofobia del suelo (WDPT) respecto a su posición con la vegetación (en claro o bajo mata). CLsin MAN = claro sin mantillo.

Figure 11. Soil hydrophobicity (WDPT) in different soil positions with regard to vegetation (clearings or under bush). CL sin MAN = in clearings without litter.



Figura 12. Relación entre WDPT(tiempo de penetración de una gota de agua) y la edad de los arbustos de retama bajo los que se obtuvo la muestra. J = joven; M = madura; S = senescente. Los intervalos de confianza son del 95%.

Figure 12. Relationship between WDPT and the age of the Retama bushes. J = young; M = mature; S = senescent. 95% interval confident.

El elevado rango de variabilidad en los resultados obtenidos con las muestras bajo retamas jóvenes se debe al efecto de la recolonización de áreas que previamente estuvieron influidas por retamas senescentes. Estas áreas, con un mayor contenido en materia orgánica y otras propiedades edáficas más idóneas, además de facilitar la germinación de semillas, presentan unos tiempos de penetración de las gotas elevados.

4.3. Incidencia de las letrinas de conejos

La acumulación de excrecias impide o dificulta la infiltración del agua, lo cual se manifiesta en el grado de humedad de los horizontes que quedan bajo la influencia de la letrina. En la figura 13 las áreas con un mayor contenido en humedad (MH, muy húmedas) se localizan en los extremos (no influidos por el efecto de las excrecias) obteniéndose tiempos de penetración en superficie no superiores a 120 s. Las pruebas rea-

lizadas sobre la superficie de la letrina una vez retirados los excrementos dieron tiempos entre los 480 s (repelencia moderada) hasta más de 4200 s (repelencia extrema). Las áreas S (secas) y H (húmedas) se localizan en profundidad justo a ambos lados de las proyecciones verticales de dichas letrinas.

Los resultados obtenidos en este experimento han sido contrastados por pruebas de laboratorio realizadas sobre las muestras recogidas bajo la influencia de estas letrinas.

5. Discusión

Las observaciones y pruebas de campo son concluyentes respecto a la existencia del fenómeno de la hidrofobia: este se produce en general asociado a acumulaciones de materia orgánica en superficie ya sea de origen vegetal (mantillo) o animal (letrinas de conejos).

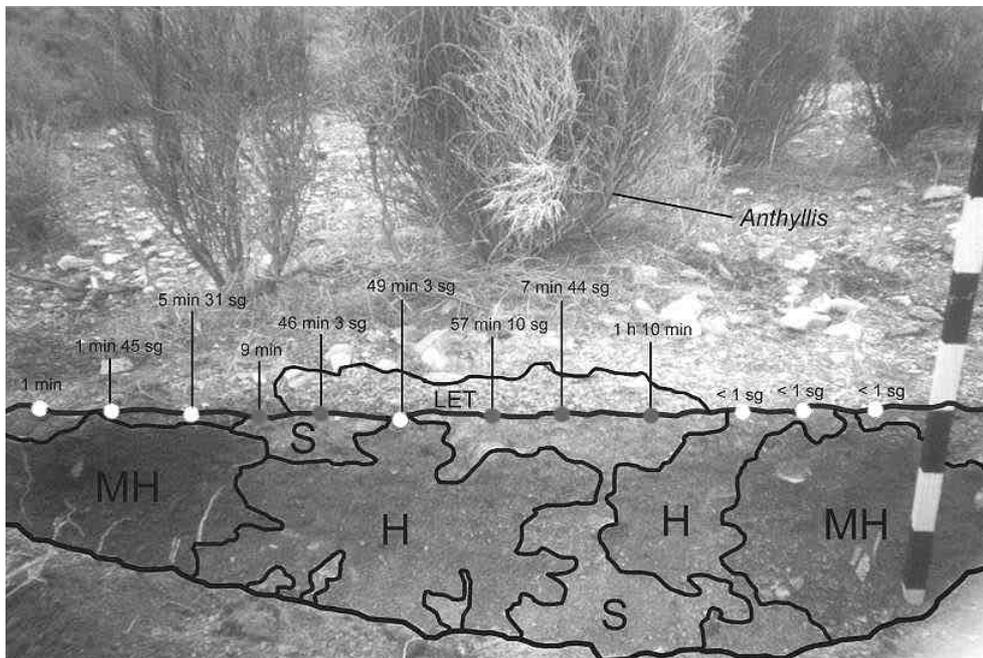


Figura 13. Calicata abierta bajo influencia de una letrina de conejos de gran tamaño. El experimento se realizó tras una lluvia natural de 18 mm e intensidad de 14 mm h⁻¹. Se observa un patrón de infiltración irregular a consecuencia de la concentración de excrecias. La humedad a lo largo del perfil contrasta fuertemente con los valores en superficie de los WDPTrealizados. MH, zona muy húmeda, tono más oscuro; H: zona húmeda, tono intermedio; S: zona seca, tono claro (foto: Contreras López).

Figure 13. Soil pit below a large rabbit latrine, just after a natural rainfall (18 mm with an intensity of 14 mm h⁻¹). An irregular infiltration front is due to the presence of excreces. The soil moisture along the profile strongly contrasts with WDPT values on the surface. MH, very wet soil, dark areas; H: wet; S: dry, light areas.

Posiblemente la vegetación sea la principal fuente de compuestos que inducen a la aparición de repelencia. Diversos estudios han sugerido que la producción de dichos compuestos hidrofóbicos pueden ser el resultado de estrategias de alelopatía que desarrollan determinadas plantas para impedir la germinación de la posible vegetación competente, a la vez que aumenta la disponibilidad del agua canalizando ésta a través de flujos preferenciales y dificultando la evaporación (Scott, 1992; Moore y Blackwell, 1998; Doerr et al., 2000). Los estudios de dichos autores tienden a magnificar la importancia de la vegetación en el mantenimiento de los mosaicos típicos de las zonas semiáridas.

Las consecuencias hidrológicas de esta hidrofobia se han podido observar en simulaciones de lluvia llevadas a cabo en la misma zona: disminución progresiva de la escorrentía (Fig. 6) hasta que la repelencia al agua desaparece. Por otro lado, la gran variabilidad temporal que caracteriza al fenómeno está muy asociada a los patrones de precipitación y temperaturas reinantes (Crockford et al., 1991; Dekker & Ritsema, 1994). El carácter estacional de la hidrofobia puede tener importantes consecuencias en los ecosistemas mediterráneos: la coincidencia a finales del periodo estival de un alto grado de hidrofobia en el suelo y una menor cobertura vegetal propician una reducción de la capacidad de infiltración. El efecto de ambos condicionantes se hace aún más sinérgico si le unimos la mayor probabilidad de ocurrencia de eventos de precipitación de carácter torrencial donde la intensidad de precipitación es superior a la capacidad de infiltración generando una escorrentía de tipo *hortoniano*. Este hecho se ha constatado al observar que las tasas de escorrentía y erosión son más pronunciadas tras prolongados periodos de sequía (Burch et al., 1989; Sevink et al., 1989; Walsh et al., 1994; Shakesby et al., 2000). En el área de estudio (zona apical y basal de los abanicos aluviales) y bajo las condiciones anteriormente descritas, las áreas cubiertas por vegetación podrían actuar como fuentes de escorrentía, tal y como demuestran las pruebas de simulación de lluvia, mientras que las áreas desnudas lo harían como sumideros. Este comportamiento, de carácter transitorio y efímero, se mantendría hasta que en los núcleos de vegetación desaparecieran los efectos de la hidrofobia y en las áreas desnudas se alcanzara la saturación de las capas más superficiales del suelo imponiéndose un flujo *hortoniano*.

Ante eventos de una intensidad extrema cabe la posibilidad de que ambas áreas pudieran comportarse paralelamente como fuentes potenciales de generación de escorrentía.

La existencia de una diferenciación textural muy marcada en los estratos superficiales del suelo (Puigdefábregas et al., 1996; Nicolau et al., 1996) y su variabilidad espacial (Puigdefábregas et al., 1999) podría explicar tanto la variabilidad del fenómeno como la existencia de frentes de infiltración heterogéneos en forma de lenguas. Además, las peculiares características fisico-químicas de las islas de fertilidad asociadas a *Retama sphaerocarpa* (Moro et al., 1997a), y por extensión a *Anthyllis cytisoides*, propician la aparición de repelencia por la alta concentración de materia orgánica que se produce bajo los arbustos.

De acuerdo con los datos de laboratorio, y según la clasificación propuesta, de toda el área analizada, sólo un 28% de la superficie estaría afectada por hidrofobia (51% según la clasificación de DeBano). Sólo un 10% del área lo estaría por una hidrofobia severa, con ambos tipos de clasificaciones. Si el muestro general se hubiera llevado a cabo antes de los dos eventos lluviosos de septiembre y octubre, los resultados posiblemente indicarían que el área afectada por hidrofobia es algo mayor que la especificada.

Las consecuencias generales de estos resultados indican que la incidencia de este fenómeno es más importante a escala de detalle, de unos pocos metros cuadrados, favoreciendo o perjudicando la infiltración cerca de un arbusto, que a escala de ladera o de cuenca, en donde el porcentaje de superficie afectada no representa más que una parte. En el caso hipotético de que dominaran arbustos senescentes, con mantillos altamente hidrofóbicos, la incidencia del fenómeno podría ser mucho más importante y afectar al comportamiento hidrológico a escala de ladera o incluso de cuenca. Los impactos ocasionados a estas dos últimas escalas han podido ser contrastados por multitud de investigaciones (Burch et al., 1989; Scott, 1993; Ferreira et al., 2000; Shakesby et al., 2000)

Las posibles contradicciones entre los resultados del fenómeno y los procesos de interacción positiva entre plantas descritas bajo influencia de retama (Pugnaire et al., 1996; Pugnaire et al., 1996; Moro et al., 1997) sugieren la necesidad de integrar la repelencia en los procesos de facilitación.

Conclusiones

Se ha puesto de manifiesto la relevancia que puede adquirir la hidrofobia en suelos arenoso-francos en una región mediterránea semiárida, lo que ha permitido confirmar las observaciones obtenidas en estudios previos de simulación de lluvia (Nicolau et al., 1996; Puigdefábregas et al., 1999) así como interpretar datos de escorrentía en parcelas durante varios años, comprobándose el carácter temporal de la hidrofobia.

El carácter general y preliminar de este trabajo sugiere la necesidad de su estudio más detallado para dilucidar las variables y condicionantes que más propician la aparición del fenómeno así como las repercusiones reales en los patrones de heterogeneidad antes descritos.

En el estudio se ha demostrado la gran importancia que adquieren las letrinas de conejos en el fenómeno de hidrofobia así como el tipo y edad de vegetación. Las islas de fertilidad asociadas a *Retama sphaerocarpa* propician la aparición de repelencia por la alta concentración de materia orgánica bajo la copa. Las posibles contradicciones entre los resultados del fenómeno y los mecanismos de interacción positiva entre plantas descritas en retamas del mismo lugar, sugieren la posibilidad de integrar la repelencia en los procesos de facilitación.

Asimismo se ha demostrado que el fenómeno tiene lugar esencialmente en una capa de arena fina, que se produce en la diferenciación textural del primitivo horizonte labrado (Solé-Benet et al., 2002), después del abandono agrícola.

Referencias bibliográficas

- Bachmann, J., Horton, R. & van der Ploeg, R.R. (2001a). Isothermal and nonisothermal evaporation from four sandy soil of different water repellency. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 1599-1607.
- Bachmann, J., Horton, R., Ren, T. & van der Ploeg, R.R. (2001b). Comparison of the thermal properties of four wettable and four water repellent soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 1675-1679.
- Bauters, T.W.J., Steenhuis, T.S., DiCarlo, D.A., Nieber, J.L., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., Parlange, J.Y. & Haverkamp, R. (2000). Physics of water repellent soils. *J. Hydrol.*, 231-232, 233-243.
- Burch, G.J., Moore, I.D. & Burns, J. (1989). Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. *Hydrol. Process.*, 3, 211-222.
- Cammeraat, L.H., Willot, S.J., Compton, S.G. & Incoll, L.D. (2002). The effects of ants' nests on the physical, chemical and hydrological properties of a rangeland soil in semi-arid Spain. *Geoderma*, 105, 1-20.
- Cerdá, A., Schnabel, S., Ceballos, A. & Gómez Amelia, D. (1998). Soil hydrological response under simulated rainfall in the Dehesa land system (Extremadura, SW Spain) under drought conditions. *Earth Surf. Process. Land.*, 23, 195-209.
- Crockford, S., Topalidis, S. & Richardson, D.P. (1991). Water repellency in a dry sclerophyll forest-measurments and processes. *Hydrol. Process.*, 5, 405-420.
- DeBano, L.F. (1981). *Water repellent soils: a state of the art*. Gen. Tech. Rep. PSW-46. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California, 21 pp.
- DeBano, L.F. (2000). Water repellency in soils: a historical overview. *J. Hydrol.*, 231-232, 4-32.
- Dekker, L.W. & Ritsema, C.J. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil, 1: Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.*, 30, 2507-2517.
- Dekker, L.W. & Ritsema, C.J. (1996). Uneven moisture patterns in water repellent soil. *Geoderma*, 70, 87-99.
- Dekker, L.W. & Ritsema, C.J. (2000). Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena*, 28, 89-105.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A. & Walsh, R.P.D. (1996). Soil hydrophobicity variations with depth and particle size fraction in burned and unburned *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinus* forest terrain in the Águeda Basin, Portugal. *Catena*, 27, 25-47.
- Doerr, S., Shakesby, R. & Walsh R.P.D. (1998). Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. *Soil Sci.*, 163, 313-324.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A. & Walsh, R.P.D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Sci. Rev.*, 51, 33-65.
- Doerr, S.H. & Thomas, A.D. (2000). The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *J. Hydrol.*, 231-232, 134-147.
- Eagleson, P.S. & Segarra, R.I. (1985). Water limited equilibrium of savanna vegetation systems. *Wat. Resour. Res.*, 21, 1483-1493.
- Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Walsh, R.P.D., Shakesby, R.A., Ceballos, A & Doerr, S.H. (2000). Hydrological implications of soil water-repellency in *Eucalyptus globulus* forests, north-central Portugal. *J. Hydrol.*, 231-232, 165-177.
- Gerke, H.H., Hangen, E., Schaaf, W. & Hüttl, R.F. (2001). Spatial variability of potential water repellency in a lignitic mine soil afforested with *Pinus nigra*. *Geoderma*, 102, 255-274.

- Gilmour, D.A. (1968). Water repellence of soils related to surface dryness. *Aust. For.*, 32, 143-148.
- Gist, C.S. & Sferra, P.R. (1978). Animal consumer roles in desert nitrogen cycles. En: *Nitrogen in Desert Ecosystems* (N.E. West & J. Skujin, eds.). Dowden Hutchison & Ross Publ., Pennsylvania (USA), 152-159.
- Hambler, D.J., Dixon, J.M. & Hale, W.H.G. (1995). Ten years in rehabilitation of spoil: Appearance, plant colonists and the dominant herbivore. *Environ. Conserv.*, 22, 323-334.
- Imeson, A.C., Verstraten, J.M., van Mulligen, E.J. & Sevink, J. (1992). The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under mediterranean type forest. *Catena*, 19, 345-361.
- Jamison, V.C. (1945). The penetration of irrigation and rain water into sandy soil of Central Florida. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 10, 25-29.
- Jaramillo, D.F., Dekker, L.W., Ritsema, C.J. & Hendrickx, J.M.H. (2000). Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *J. Hydrol.*, 231-232, 105-111.
- Josa March, R., Arias, X. & Solé, A. (1994). Effects of slash-burning on some soil physical properties in an oak-coppice. En: *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires* (M. Sala & J.L. Rubio, eds). Geoforma Ediciones, Logroño (España), 29-42.
- King, P.M. (1981). Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Aust. J. Soil Res.*, 19, 275-285.
- Krammes, J.S. & DeBano, L.F. (1965). Soil wettability: a neglected factor in watershed management. *Water Resour. Res.*, 1, 283-286.
- Letey, J., Osborn, J.F. & Valoras, N. (1975). *Soil water repellency and the use of nonionic surfactants*. California Water Resources Center Technical Comp. Report 154. Universidad de California, Davis. 85 pp.
- Letey, J., Carrillo, M.L.K. & Pang, X.P. (2000). Approaches to characterize the degree of water repellency. *J. Hydrol.*, 231-232, 61-65.
- Moro, M.J., Pugnaire, F.I., Haase, P. & Puigdefábregas, J. (1997a). Mechanisms of interaction between a leguminous shrub and its understorey in a semi-arid environment. *Ecography*, 20, 175-184.
- Moro, M.J., Pugnaire, F.I., Haase, P. & Puigdefábregas, J. (1997b). Effect of the canopy of *Retama sphaerocarpa* on its understorey in a semiarid environment. *Funct. Ecol.*, 11, 425-431.
- Nicolau, J.M., Solé-Benet, A., Puigdefábregas, J. & Gutiérrez, L. (1996). Effects of soil and vegetation on runoff along a catena in semi-arid Spain. *Geomorphology*, 14, 297-309.
- Peterson, P. (2001). *The effects of the wild rabbit (Oryctolagus cuniculus) on soils and vegetation in semi-arid, south-eastern Spain*. Tesis doctoral inédita, University of Leeds, UK.
- Pickup, G. & Chewings, V.H. (1986). Random field modelling of spatial variations in erosion and deposition in flat alluvial landscapes in arid central Australia. *Ecol. Mod.* 33, 269-296.
- Powell, J. M., Fernández-Rivera, S. & Höfs, S. (1994). Effects of sheep diet on nutrient cycling in mixed farming systems of semi-arid West Africa. *Agric. Ecosys. Environ.*, 48, 263-271.
- Pugnaire, F.I., Haase, P. & Puigdefábregas, J. (1996a). Facilitation between higher plant species in a semiarid environment. *Ecology*, 77 (5), 1420-1426.
- Pugnaire, F.I., Haase, P., Puigdefábregas, J., Cueto, M., Clark, S.C. & Incoll, L.D. (1996b). Facilitation and succession under the canopy of a leguminous shrub, *Retama sphaerocarpa*, in a semi-arid environment in south-east Spain. *Oikos*, 76, 455-464.
- Puigdefábregas, J. & Sánchez, G., 1996. Geomorphological implications of vegetation patchiness on semi-arid slopes. En: *Advances in hillslope processes* (Anderson & Brooks, eds). Wiley, Londres, pp. 1027-1060.
- Puigdefábregas, J., Alonso, J.M., Delgado, L., Domingo, F., Cueto, M., Gutiérrez, L., Lázaro, R., Nicolau, J.M., Sánchez, G., Solé, A., Vidal, S., Aguilera, C., Brenner, A., Clark, S. & Incoll, L. (1996). The Rambla Honda field site: interactions of soil and vegetation along a catena in semi-arid southeast Spain. En: *Mediterranean Desertification and Land Use* (C.J. Brandt & J.B. Thornes, eds.). Wiley, Londres (Gran Bretaña), 137-168.
- Puigdefábregas, J., Solé, A., Gutiérrez, L., del Barrio, G. & Boer, M. (1999). Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in SE Spain. *Earth-Sci. Rev.*, 48, 39-70.
- Ritsema, C.J., Nieber, J.L., Dekker, L.W. & Steenhuis, T.S. (1998). Stable or unstable wetting fronts in water repellent soils – effect of antecedent soil moisture content. *Soil Till. Res.*, 47, 111-123.
- Scott, D.F. (1993). The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. *J. Hydrol.*, 150, 409-432.
- Sevink, J., Imeson, A.C. & Verstraten, J.M. (1989). Humus form development and hillslope runoff, and the effects of fire and management, under Mediterranean forest in N.E. Spain. *Catena*, 16, 337-355.
- Shakesby, R.A., Doerr, S.H. & Walsh, R.P.D. 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *J. Hydrol.*, 231-232: 178-191.
- Slatyer, R.O. & Mabbitt, J.A. (1964). Hydrology of arid and semiarid regions. En: *Handbook of Applied Hydrology* (V.T. Chow, ed.). McGraw Hill, New York (USA), 24-46.
- Solé-Benet, A., Pini, R. & Raffaelli, M. (2002). Hydrological consequences of soil surface type and condition in colluvial mica-schist soils after agricultural abandonment. En: *Man and soil at the third millenium* (J.L. Rubio, R.P.C. Morgan, S. Asins & V. Andreu, eds.). Geoforma Ediciones, Logroño (España), 523-533.

- Spetch, R.L. (1972). Water use by perennial evergreen plant communities in Australia and Papua Nueva Guinea. *Aust. J. Bot.*, 20, 273-299.
- Teramura, A.H. (1980). Relationships between stand age and water repellency of chaparral soils. *Bull. Torrey Botanical Club*, 107 (1), 42-46.
- Valentin, C. & Bresson, L.M. (1992). Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55, 225-245.
- Van't Woudt, B.D. (1959). Particle coatings affect the wettability of soils. *J. Geophy. Res.*, 64, 263-267.
- WRSPR (1999). Water Repellent Soils Project Report. <http://www.alterra.nl/water-repellency>.
- Wallis, M.G. & Horne, D.J. (1992). Soil water repellency. En: *Advances in Soil Science* (B.A. Stewart, ed.). Springer, New York (USA), 91-146.
- Walsh, R.P.D., Boakes, D., Coelho, C.O.A., Gonçalves, A.J.B., Shakesby, R.A. & Thomas, A.D. (1994). Impact of fire-induced water repellency and post-fire forest litter on overland flow in northern and central Portugal. *Proceedings of the Second International Conference on Forest Fire Research*, Vol., 2. Coimbra (Portugal), 1149-1159.
- Watson, C.L. & Letey, J. (1970). Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tension relationships. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 841-844.
- Willot, S.J., Miller, A.J., Incoll, L.D., Compton, S.G. (2000). The contribution of rabbits (*Oryctolagus cuniculus* L.) to soil fertility in semi-arid Spain. *Biol. Fertil. Soils*, 31, 379-384.
- Yair, A. & Lavee, H. (1985). Runoff generation in arid and semi-arid zones. En: *Hydrological Forecasting* (M.G. Anderson & T.P. Burt, eds.). Wiley, Londres, 183-220.

Recibido 10 de junio de 2002.

Aceptado 28 de noviembre de 2002.