

## REPELENCIA AL AGUA EN SUELOS FORESTALES AFECTADOS POR INCENDIOS Y EN SUELOS AGRÍCOLAS BAJO DISTINTOS MANEJOS Y ABANDONO

M. B. BODÍ<sup>(1,2,3)\*</sup>, A. CERDÀ<sup>(1)</sup>,  
J. MATAIX-SOLERA<sup>(2)</sup>, S. H. DOERR<sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> SEDER-Soil Erosion and Degradation Research Group. Departament de Geografia. Universitat de València, Blasco Ibàñez, 28, 46010-Valencia, Spain.

<sup>2</sup> GEA- Grupo de Edafología Ambiental. Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente. Universidad Miguel Hernandez, Elche (Alicante), Spain.

<sup>3</sup> School of the Environment and Society, Swansea University, Swansea, UK.

**RESUMEN.** *La repelencia al agua del suelo puede condicionar la cantidad de agua disponible en el suelo, la generación de escorrentía y los procesos geomorfológicos. Este estudio cuantifica la repelencia al agua del suelo durante los meses de verano de 2008 y 2009 en zonas forestales afectadas por el fuego en diferentes años y en suelos bajo distintos manejos agrícolas utilizando el test del Tiempo de Penetración de la Gota de Agua (WDPT test). Los resultados indican que la repelencia al agua aparece con mayor frecuencia y persistencia en suelos forestales que en agrícolas. En los suelos forestales, disminuye al cabo de un año tras un incendio y se recupera tras al menos más de 12 años. En los agrícolas, aparece en suelos con cubiertas vegetales, pero es inexistente en suelos tratados con herbicidas y labrados. La presencia de la repelencia al agua se debe a la incorporación al suelo de biomasa vegetal conforme la vegetación se recupera tras el incendio o tras el abandono de los campos de cultivo, y procedente de las siegas o abonos verdes en el caso de los suelos agrícolas. Los niveles de repelencia al agua cuantificados no son suficientemente elevados ni presentan la suficiente continuidad espacial como para provocar elevadas tasas de escorrentía y erosión en suelos agrícolas estudiados, aunque pueden ocurrir tras incendios forestales si la vegetación todavía no se ha restablecido. El abandono del campo supone un aumento de la repelencia que en este caso se ha visto reducida después de un incendio.*

**Water repellency in forest soils affected by fires and agricultural soils with different agricultural management and abandonment**

**ABSTRACT.** *Soil water repellency determines the water available in the soil system, the runoff generation and the geomorphologic processes. This study examines the soil wettability during the summer of 2008 and 2009 in forest soils*

*with different fire history, and in agricultural soils with different managements. Water repellency was assessed using the Water Drop Penetration Time test (WDPT). Results indicate that water repellency is more frequent and persistent in forest soils than in agricultural ones. In the former, water repellency is reduced a year after a fire and is not recovered during at least 12 years. In agricultural soils, it is found under no till treatment, whereas sites treated with herbicides or tillage were virtually unaffected. Water repellency is exhibited because of the increment of aboveground biomass and organic matter content as the vegetation is recovered following a wildfire or after abandoned crop fields, and after adding reaping or with green manure. In any case, water repellency levels are not either high or continuous enough to produce important runoff and erosion rates in the agricultural soils, although this can occur after forest fires if the soil it is not still protected by the vegetation recovery. Land abandonment trigger the water repellency on soils, and in our case fire reduce it for some years.*

**Palabras clave:** hidrofobicidad, materia orgánica, no labrado, incendio forestal, manejo agrícola.

**Key words:** hydrophobicity, soil organic matter content, no till, forest fire, agricultural management.

Enviado el 28 de octubre de 2011

Aceptado el 16 de enero de 2012

\* Correspondencia: SEDER-Soil Erosion and Degradation Research Group. Department de Geografia. Universitat de València, Blasco Ibáñez, 28, 46010-Valencia, Spain. E-mail: merche.bodi@uv.es

## 1. Introducción

El suelo es una parte fundamental del sistema terrestre donde se producen la mayoría de las transformaciones de la energía y de la materia de los ecosistemas e interviene en el ciclo del agua y de los elementos biogeoquímicos. Uno de los componentes básicos del suelo es el agua. Sin agua se verían impedidas la descomposición de la materia orgánica, algunas formas de meteorización y los procesos edafogenéticos. Además, el agua junto a los nutrientes del suelo forman la solución del suelo, el medio por el cual las raíces de las plantas absorben los nutrientes.

La estructura del suelo permite que el agua se infiltre y parte de ella quede retenida en su sistema de poros. Sin embargo, en determinadas circunstancias, algunos suelos pueden presentar repelencia al agua (hidrofobicidad) y, como consecuencia, la infiltración puede verse retardada o impedida parcialmente. La resistencia a la humectación puede durar intervalos de tiempo que oscilan entre segundos, horas, días o semanas (Doerr *et al.*, 2000). La repelencia al agua tiene repercusiones hidrológicas y geomorfológicas al reducir la capacidad de infiltración e inducir a la vez escorrentía superficial,

flujos preferenciales y erosión del suelo, principalmente en la salpicadura y en la formación de surcos. Estos procesos implican una distribución desigual de la humectación del perfil, problemas para el crecimiento de las plantas y mayor lixiviación de nutrientes y sustancias agroquímicas, como lo demuestran los trabajos de York (1993), Ritsema y Dekker (2000), o Shakesby *et al.* (2000), entre otros.

La repelencia al agua del suelo es causada por ciertos compuestos orgánicos hidrofóbicos que se encuentran en la materia orgánica intersticial o recubriendo las partículas minerales y las superficies de los agregados (Franco *et al.*, 2000; Mataix-Solera y Doerr, 2004). Estas sustancias hidrofóbicas proceden de plantas vivas y de materia orgánica en descomposición, resinas, ceras, aceites aromáticos, de los exudados de las raíces y de productos de hongos y microorganismos. Sin embargo, todavía no se han identificado los compuestos orgánicos hidrofóbicos concretos que la producen (Doerr *et al.*, 2000; González-Vila *et al.*, 2009).

La repelencia al agua es un fenómeno más común de lo que la comunidad científica asumía hace dos décadas (Doerr, 2000). Aunque las primeras medidas en campo indicaron que los suelos repelentes se encontraban en áreas semiáridas y mediterráneas (como California y Australia), más tarde se ha medido hidrofobicidad en suelos de todo el mundo, sobre todo en Holanda, Reino Unido, Portugal, Suecia y norte de EEUU, donde, por otra parte, se han realizado más mediciones. La repelencia al agua se aborda desde múltiples disciplinas: edafología, agronomía, geoquímica, geomorfología e hidrología; por lo que la visión global de la geografía física puede contribuir en gran medida a su mejor comprensión.

La hidrofobicidad del suelo no es una propiedad continua, ni temporal ni espacialmente. Su variabilidad espacial en el suelo, oscila desde escala de milímetros a escalas de cuencas de drenaje. A escala menor de un metro, la repelencia varía tanto horizontal como verticalmente, ya que la distribución de las sustancias hidrofóbicas no suele ser uniforme. La continuidad de la repelencia al agua a micro-escala determinará si la escorrentía que se genera es general, local o puntual y es por tanto de gran importancia en los procesos hidrológicos y geomorfológicos de una cuenca de drenaje (Doerr *et al.*, 2000).

A escala regional, la mayoría de estudios se han realizado en suelos forestales y en concreto tras incendios forestales. Después de un incendio, la hidrofobicidad puede aparecer, reducirse o intensificarse. Estudios de laboratorio muestran que la repelencia al agua se intensifica a temperaturas entre 175 y 270°C, pero se destruye a temperaturas por encima de 270 hasta 400°C (según el tiempo de combustión) (Doerr *et al.*, 2000). Esto es debido a cambios en la estructura de las moléculas orgánicas durante la combustión (Savage *et al.*, 1972), y a que las sustancias orgánicas hidrofóbicas se volatilizan durante el calentamiento desplazándose en profundidad según el gradiente de temperatura, hasta que se condensan a pocos centímetros bajo de la superficie (DeBano *et al.*, 1976). Independientemente de si ha ocurrido un incendio forestal, la repelencia al agua se asocia a la presencia de diversas especies vegetales, pero no se puede asumir que éstas siempre induzcan repelencia al agua ni actúen con la misma intensidad. Las más comunes suelen ser árboles de hoja perenne, ricos en resinas, ceras y aceites aromáticos

(por ejemplo: *Pinus sp.*, *Eucaliptus sp.* y *Quercus sp.*), aunque también se ha detectado bajo herbáceas, arbustos y árboles de hoja caduca (Doerr et al., 2000; Mataix-Solera et al., 2007; Zavala et al., 2009).

Con el abandono de los usos agrícolas, se produce un aumento de la materia orgánica en los suelos, y con ello se puede producir un incremento de la repelencia (Arce-negui et al., 2007; Mataix-Solera et al., 2007). Un ejemplo del intenso cambio ambiental que supone el abandono del campo está en el norte de la cuenca mediterránea donde se produjo un rápido abandono del campo a partir de los años 50, que ha dado lugar a cambios en los procesos edáficos y geomorfológicos, como demuestran los trabajos de García Ruiz y Lasanta (1990), Lasanta et al., (1995), García Ruiz et al., (1995), García Ruiz y Valero (1998) y cambios en la vegetación (Lasanta y Vicente-Serrano, 2007). Esto ha producido unas transformaciones del paisaje en general (Vicente Serrano et al., 2000) y cambios que nunca antes habían ocurrido en su territorio (Arnáez et al., 2011). La influencia del uso del suelo y los procesos erosivos ha sido estudiada durante cuatro décadas por distintos investigadores. Una visión global y sintética de esa investigación se puede encontrar en García Ruiz (2010).

La repelencia no ocurre solamente en suelos forestales, también bajo herbáceas en dunas y campos de golf, pastos y suelos agrícolas. Se estima que el 75% de los prados de herbáceas y suelos cultivados en los Países Bajos son repelentes al agua (Dekker y Ritsema, 1994), y que en el sur de Australia 5 millones de hectáreas están afectadas por suelos hidrofóbicos, hecho que provoca pérdidas de más del 80% en la agricultura. Se ha medido repelencia al agua en campos de cítricos en Florida (Jamison, 1947), en suelos con sistemas agrícolas de no labrado (Hallett et al., 2001; Blanco-Canqui y Lal, 2009), y también en campos regados con aguas residuales (Wallach et al., 2005; Mataix-Solera et al., 2011). Según Blanco-Canqui y Lal (2009), existe una necesidad de cuantificar la repelencia al agua en los suelos agrícolas y consideran que es necesario clarificar sus efectos en distintos suelos, manejos y condiciones climáticas.

El objetivo de este trabajo es aportar información sobre la hidrofobicidad de los suelos bajo distintos manejos y con distintos usos, con especial referencia a los cambios tras el abandono. Para ello se han elegido los suelos estudiados en la estación experimental de “El Teularet-Sierra de Enguera”, donde están representados usos y manejos actuales y pasados de las zonas de secano mediterráneas en las que se ha producido un rápido abandono, como en muchas otras zonas de montaña en el mediterráneo norte. Se ha prestado especial atención a los suelos agrícolas, ya que han sido los menos estudiados hasta el momento, y también al efecto de los incendios forestales sobre la repelencia de los suelos, por ser el fuego un factor recurrente en los espacios forestales mediterráneos tras el abandono del campo. El estudio de los suelos abandonados pasa por conocer el estado de los suelos antes de su abandono –distintos manejos– y después, cuando al retomar la condición de forestales se inician en ellos varios procesos (revegetación, aumento de la materia orgánica, recuperación de la estabilidad estructural, diversificación y aumento de la biota...) que modificarán su comportamiento edáfico, hidrológico y geomorfológico.

## 2. Métodos

### 2.1. Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en la Sierra de Enguera, en el interior de la Provincia de Valencia. La experiencia se ha llevado a cabo en suelos forestales de la Sierra de Enguera y en suelos de uso agrícola de la estación experimental para el estudio de la erosión y degradación de suelos de “El Teularet-Sierra de Enguera” (fig. 1). En la Sierra de Enguera el clima es mediterráneo. La precipitación media anual oscila entre 479 mm en la estación meteorológica Enguera-Las Arenas y 537 mm en Enguera-La Matea. La media anual de días de lluvia es 37.9 y 35.7 en las mismas estaciones, y la temperatura media anual es de 14.2 y 12.7°C. El mes más frío es enero con 7.3°C y el más cálido agosto con una temperatura media de 23°C (Bodí y Cerdà, 2008).

En la estación experimental de El Teularet-Sierra de Enguera (38° 55' N, 00° 50' W), a 750 m s.n.m., se realiza una investigación sobre la infiltración, escorrentía y erosión del suelo en diferentes manejos agrícolas (fig. 2). Para ello, desde Febrero del 2004 se instalaron 13 parcelas de erosión y en cada parcela se aplicaron diferentes manejos agrícolas: herbicida de contacto, herbicida sistémico, herbicida residual, labrado tradicional, cubiertas con avena y veza sin labrar, avena y veza labrados, herbáceas de auto-siembra (*Medicago sp.*) sin labrado, acolchado con paja, acolchado con restos de poda, control y acolchado con geotextiles. Dos parcelas más se situaron en campos abandonados y matorral. Estos tratamientos representan las estrategias de cultivo de la región del Macizo del Caroig, y los usos existentes y alternativos para alcanzar una agricultura sostenible. Anteriormente, la zona se dedicaba al cultivo de almendros y trigo con un labrado intensivo, además de la agricultura y ganadería de subsistencia, con nulos insumos y escasas salidas comerciales. Las parcelas se instalaron en una terraza con una ligera inclinación (5%), la litología de la zona son margas cretácicas y el suelo es un Xerorthent típico (Soil Survey Staff, 2006; tabla 1).

Tabla 1. Características de los suelos muestreados.

Zonas de estudio	Características	Textura (% arena, limo, arcilla)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Color (Tabla Munsell)	Materia orgánica (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)
PA	Suelo agrícola El Teularet antes de la instalación de las parcelas	39, 38, 23	8.3	185	2.5 Y 7/6	2	59.8
I79	Incendio 1979	28, 31, 41	8.5	155.8	10 YR 4/4	7.22	43.13
I99	Incendio 1979, 2001	42, 34, 24	8.5	132.2	10 YR 3/2	6.21	47.63
I08	Incendio 1979, 2008	30, 45, 25	8.3	246	7.5 YR 3/2	9.93	37.82

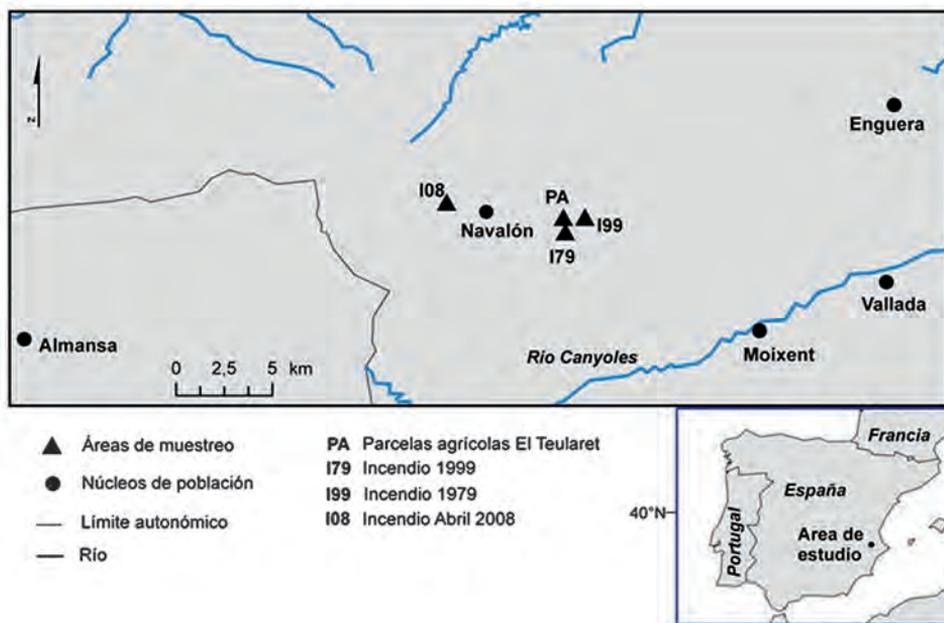


Figura 1. Localización de la zona de estudio y áreas de muestreo.



Figura 2. Parcelas estación experimental para el estudio de la erosión y degradación de los suelos de “El Teulet-Sierra de Enguera”. Cada una de ellas se trata con un manejo diferente (ver Bodí y Cerdà, 2008b).

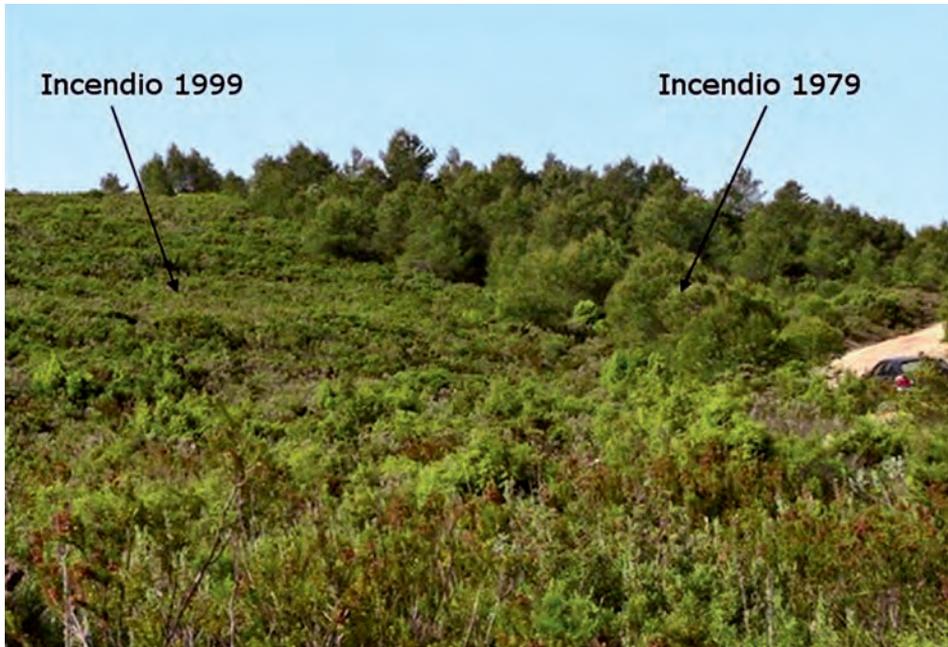
Por otro lado, se seleccionaron dos zonas forestales. Una de ellas es casi contigua a la terraza de cultivo donde se instaló la estación experimental y que no se ha cultivado desde hace 40 años. Esta zona tuvo un incendio en 1979 y una parte volvió a quemarse en 1999 (fig. 3). Se instalaron dos parcelas experimentales para cada año de los incendios. El substrato geológico está constituido por calcarenitas y margas cretácicas, y el suelo es un Xerorthent lítico (Soil Survey Staff, 2006). La otra zona forestal seleccionada donde se instalaron dos parcelas más se encuentra a unos 6 km de El

Teularet, cerca del núcleo de Navalón (Enguera), en la partida del Santich (38° 55' N, 00° 54' W) a 850 m s.n.m. El 8 de abril de 2008 se produjo un incendio de 89 ha en una zona que también había ardido en 1979 (fig. 4). El incendio fue de alta severidad según el color de las cenizas (Bentley y Fenner, 1958) y otros indicadores post-incendio descritos en Keeley (2009). El substrato geológico son calizas y calcarenitas cretácicas y el suelo es también un Xerorthent lítico (Soil Survey Staff, 2006; tabla 1). En ambas zonas, la vegetación es mixta de pinar de *Pinus halepensis* M., tanto de repoblaciones anteriores como espontáneos, y matorral de *Quercus coccifera* L., *Rosmarinus officinalis* L., *Juniperus oxycedrus* L., *Erica multiflora* L., *Pistacia Lentiscus* L. y *Brachypodium retusum* Pers. (Beauv.).

Los muestreos se realizaron bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad atmosféricas, en las once parcelas agrícolas de la estación experimental de El Teularet (en áreas destinadas al muestreo destructivo del suelo) y en las tres zonas forestales bajo matorral de *Quercus coccifera* (tabla 2).

Tabla 2. Características de los tratamientos en las parcelas estudiadas en la estación de El Teularet-Sierra de Enguera.

Parcela	Tratamiento	Descripción del tratamiento
1	HC	Herbicida de contacto: 3 tratamientos anuales
2	HS	Herbicida sistémico: 3 tratamientos anuales
3	HR	Herbicida residual: 2-3 tratamientos anuales
4	L	Labrado: 3 / 4 tratamientos labrados anuales
5	LAV	Labrado-Abono verde: 60% avena; 40% veza (3 pases de labor)
6	NLAV	No labrado-Abono verde: 60% avena; 40% veza (siega)
7	NLLG	No labrado-Cubierta de leguminosas: <i>Medicago sativa</i> L.
8	NLAP	No labrado-Acolchado de paja
9	NLRP	No labrado-Restos de poda
10	C	Control (Abandonado): Recuperación natural de la vegetación
11	A	Agrogeotextil: Algodón reciclado
12	I79	Zona forestal: Incendio 1979
13	I99	Zona forestal: Incendio 1999
14	I08	Zonal forestal: Incendio abril 2008



*Figura 3. Vista de las zonas de estudio afectadas por incendios forestales en 1999 y 1979.*



*Figura 4. Vista de la zona de estudio afectada por el incendio de 2008.*

## 2.2. Análisis de suelos

Las medidas se realizaron durante los meses de julio y agosto de 2008 y 2009, cuando el contenido de agua del suelo es menor del 5% en el primer centímetro del suelo y así minimizar el efecto de la humedad en la hidrofobicidad (Doerr y Thomas, 2000).

La repelencia al agua se ha medido *in situ* mediante el test de penetración de la gota de agua (WDPT), que mide la persistencia de la hidrofobicidad, es decir el tiempo que transcurre hasta la completa penetración del agua en el suelo (Dekker *et al.*, 1999). Para ello, en dos micro-parcelas de 10 x 10 cm, se realizaron medidas con 10 gotas de agua destilada colocadas sobre la superficie del suelo mineral, eliminando primero todos los restos orgánicos de la superficie (Doerr *et al.*, 1998) y 10 gotas a 1 cm de profundidad, ya que la capa repelente al agua se encuentra a veces paralela y por debajo de la superficie del suelo (DeBano, 1981). Los valores de repelencia obtenidos se clasificaron en intervalos desde la categoría de hidrofílico, WDPT  $\leq 5$  s, hasta de hidrofobicidad extrema, WDPT  $>3600$ s (tabla 3) según Bisdorn *et al.*, (1993).

Tabla 3. Clases e intervalos de repelencia al agua según el test del Tiempo de Penetración de la Gota de Agua, WDPT test (a partir de Bisdorn *et al.*, 1993).

		Repelencia al agua								
	Hidrofílico	Ligera			Fuerte			Severa	Extrema	
WDPT clases	$\leq 5$	10	30	60	180	300	600	900	3600	$> 3600$
WDPT intervalo (s)	$\leq 5$	6-10	11-30	31-60	61-180	181-300	301-600	601-900	901-3600	$> 3600$

La materia orgánica del suelo (0-5 cm) se ha determinado en el laboratorio mediante el método de la oxidación con dicromato potásico (Nelson y Sommers, 1982). Esto se realizó para las muestras agrícolas antes de su instalación y de ningún tratamiento, para las muestras tomadas en 2008 y para los suelos forestales muestreados en 2008.

## 3. Resultados

### 3.1. Repelencia al agua en superficie en los diferentes usos del suelo

La repelencia al agua en superficie es inexistente en los tratamientos con herbicidas (HC, HS, HR) y en los tratamientos de labrado (L, LAV), así como en el agrogeotextil (A) en los diferentes meses de estudio (fig. 5). Los tratamientos de no labrado en cambio, mostraron una ligera repelencia al agua. En 2008, se detecta repelencia en agosto en los tratamientos que se aplica paja (NLAP) y restos de poda (NLRP) (15% de las muestras). En ambos meses de verano de 2009, existe repelencia al agua además de en estos tratamien-

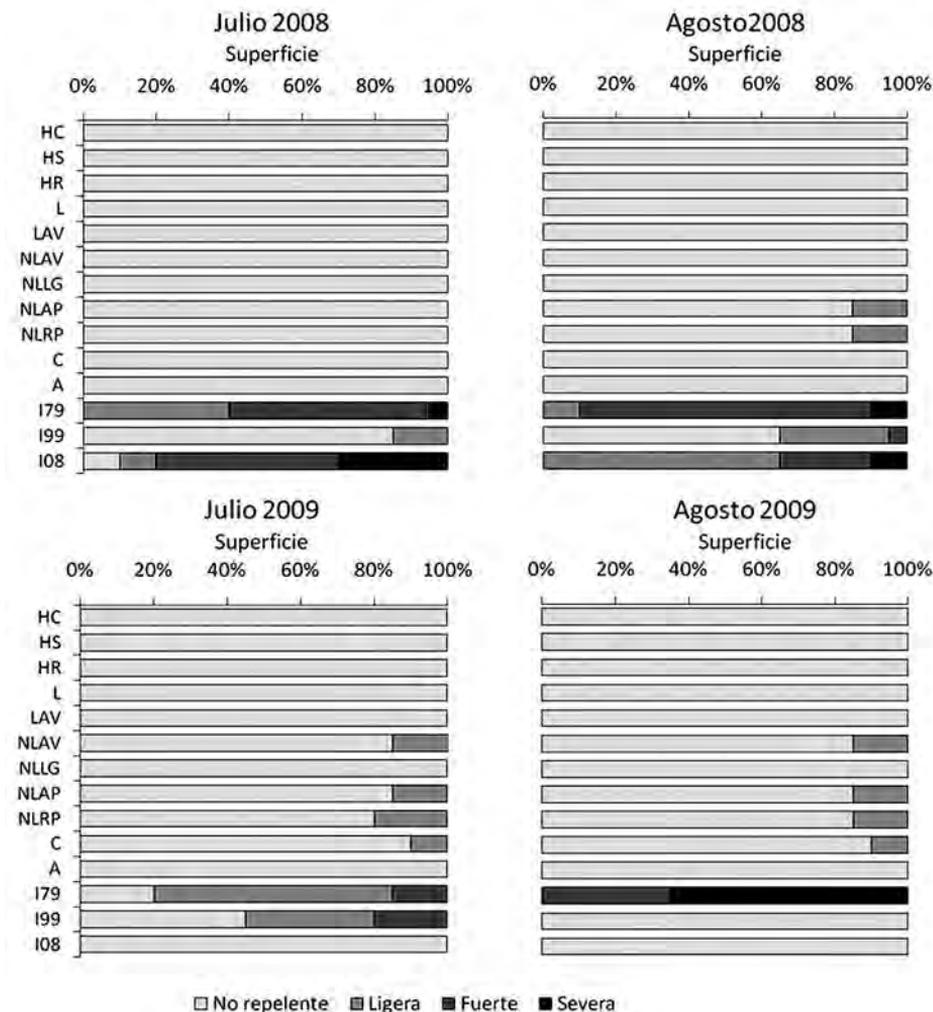


Figura 5. Frecuencia relativa de las clases de hidrofobicidad (medida en segundos) del suelo en cada parcela durante los meses de julio y agosto de 2008 y 2009 en superficie (n = 20 en cada tratamiento y mes).

tos anteriores (NLAP, 15% de las muestras, NLRP, 20%), en el abono verde sin labrar (NLAV, 20%) y en la parcela control (C, 10%). La parcela con leguminosas (NLLG), es la única de los tratamientos no labrados donde no se detectó repelencia.

En los suelos forestales, la repelencia al agua es más frecuente y persistente que en los agrícolas sobre todo en la zona afectada por el incendio de 1979 (I79) (100% muestras son repelentes en 2008) y en la del incendio de 2008 durante el primer año (I08) (90% de las muestras son repelentes) (fig. 5).

### *3.2. Variación temporal*

En las parcelas agrícolas en julio 2008, no aparece repelencia al agua en superficie ni a 1 cm de profundidad, y en agosto sólo en dos parcelas sin labrar, la que se aplica paja y restos de poda (NLAP y NLRP). En el 2009, la repelencia al agua se detecta en todas las parcelas sin labrar en los dos meses de verano, excepto en leguminosas (NLLG) y la control (C).

Respecto a las zonas con incendios forestales, los resultados indican que, mientras la repelencia al agua en el incendio de 2008 (I08) llegó a ser incluso severa en superficie el primer año (30% de las muestras en julio y 10% en agosto), en el año 2009, ninguna de las muestras resultó ser repelente al agua en superficie. En las otras zonas forestales, la repelencia no sufrió cambios importantes entre los dos años de estudio. Si analizamos la relación entre la repelencia al agua y el tiempo tras el incendio, se aprecia que el porcentaje de las muestras repelentes es mayor en la zona donde más tiempo ha pasado tras el incendio (I79), a excepción de la zona quemada en abril de 2008 (I08) el primer año tras el fuego.

### *3.3. Variaciones de la repelencia al agua a micro-escala: espacial en superficie y en profundidad*

En los resultados se observa que coexisten diversos grados de repelencia (ligera, fuerte y severa) en el mismo suelo, en un espacio de 10 x 10 cm. Este hecho muestra cómo la repelencia al agua es muy variable a escala de milímetros, sobre todo en las zonas forestales.

También en profundidad, en un espacio de 1 cm de diferencia se pueden encontrar presencia o no de repelencia al agua en el suelo y distintos grados de persistencia (fig. 6). Normalmente, cuando se detecta en profundidad, los valores son menores en cuanto a frecuencia y persistencia, excepto en el caso del incendio de 2008 (I08) donde la repelencia al agua desaparece en superficie y continua en profundidad, aunque con poca persistencia en un 30% de las muestras en julio y 35% en agosto.

### *3.4. Contenido de materia orgánica del suelo*

La materia orgánica del suelo agrícola en 2003 era del 2%. Después de casi 5 años de diferentes tratamientos, esta propiedad del suelo ha aumentado en las parcelas control (C) y sin labrar, llegando a alcanzar un 2.33% en la control y un 3.20% en la que se le aporta paja (NLAP) (tabla 4). En el caso de los tratamientos con herbicidas no hay cambios significativos y, en el agrogeotextil la disminución es mayor porque no hay ningún aporte de materia orgánica fresca, ya que el suelo está cubierto permanentemente con la capa textil de algodón. El suelo forestal tiene los valores más elevados de materia orgánica que oscilan entre 6.2 y 9.9%. Se ha analizado la relación entre el contenido de materia orgánica de cada parcela (muestreada en julio de 2008) y la media de los valores de repelencia al agua en los meses de julio y agosto de 2008 obteniendo un coeficiente de correlación lineal de  $r = 0.9049$  (fig. 7).

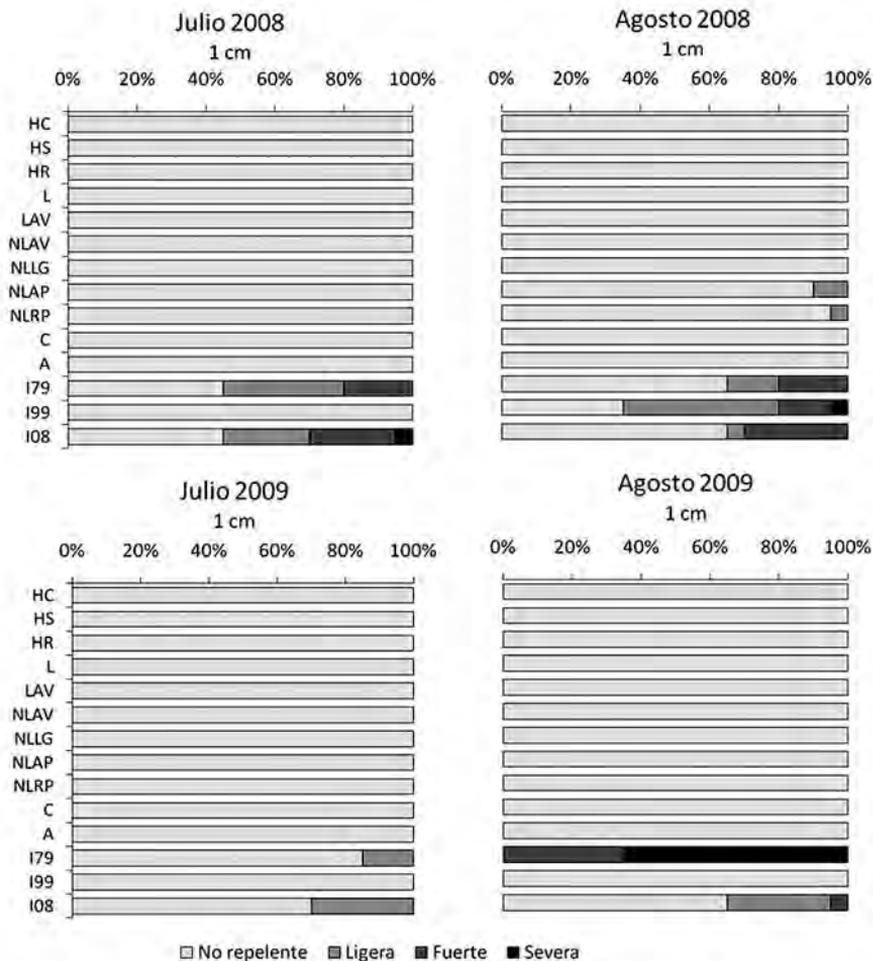


Figura 6. Frecuencia relativa de las clases de hidrofobicidad (medida en segundos) del suelo en cada parcela durante los meses de julio y agosto de 2008 y 2009 a 1 cm de profundidad (n = 20 en cada tratamiento y mes).

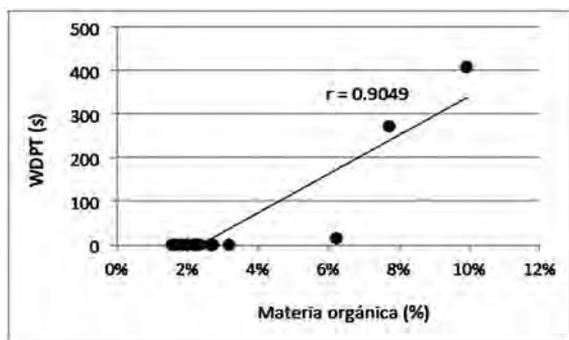


Figura 7. Relación lineal entre la materia orgánica del suelo de cada tratamiento muestreada en julio de 2008 (%) y la media de los valores de repelencia al agua (WDPT, segundos) de julio y agosto de 2008.

Tabla 4. Contenido de materia orgánica del suelo (%) para cada parcela en el año 2008 (0-5cm). En las parcelas agrícolas se iniciaron los tratamientos en 2003 cuando la materia orgánica del suelo era un 2%.

Parcela	Tratamiento	Materia orgánica (%) 2008
1	HC	1.99
2	HS	2.18
3	HR	1.64
4	L	2.24
5	LAV	1.82
6	NLAV	2.74
7	NLLG	2.67
8	NLAP	3.20
9	NLRP	2.67
10	C	2.33
11	A	1.57
12	I79	7.22
13	I99	6.21
14	I08	9.93

## 4. Discusión

### 4.1. Diferencias en la repelencia al agua según los usos del suelo

Los resultados de este estudio indican que la repelencia al agua existe en campos de cultivo no labrados y en suelos forestales. La repelencia al agua no se detecta en los suelos agrícolas tratados con herbicidas ni en suelos labrados.

En la bibliografía se corrobora la existencia de repelencia al agua ligera en los cultivos con suelo no labrado respecto a labrados. Keizer *et al.* (2008), comparó la persistencia y las variaciones temporales de la hidrofobicidad en un suelo de plantación de eucalipto con y sin labrar y comprobó que éste destruye la repelencia al agua del suelo, pero que a los 4-5 años de no labrar la repelencia vuelve a aparecer. Doerr *et al.* (2006), midió la repelencia al agua en diferentes usos del suelo del Reino Unido (pasto, bosque de coníferas, bosque de árboles de hoja caduca, arbustos, agricultura, etc.) y encontró que la mayor frecuencia de la repelencia al agua del suelo aparecía en lugares con vegetación permanente, sin llegar a existir en suelos arados, excepto en una zona cultivada de patatas con agricultura ecológica. Blanco y Canqui (2009) observaron que el no labrar induce fuertemente repelencia al agua en el suelo, comparado con el labrado y la detectan

incluso en profundidad, ya que el suelo no se remueve. Sin embargo, también se ha comprobado la existencia de repelencia al agua en algunos suelos labrados en el sureste de Grecia (Ziogas, *et al.*, 2005) y en la costa oeste de Australia (Blackwell, 2000).

En la estación experimental de El Teularet-Sierra de Enguera, el hecho de que los suelos no labrados y la parcela control, presenten mayor repelencia al agua se atribuye a la presencia de abundante biomasa sobre el suelo y posiblemente a un incremento de la actividad de macro- y micro- organismos (Blanco-Canqui y Lal, 2009). De hecho García-Orenes *et al.*, (2008) encontraron mayor biomasa microbiana en estas mismas parcelas. Esto explicaría que no existiese repelencia en los suelos tratados con herbicida ni en el tratamiento con agrogeotextil. En los suelos labrados, otros factores que reducen o destruyen la repelencia según diversos autores son: la remoción y mezcla de suelo (Keizer *et al.*, 2008), la incorporación de arcillas del subsuelo a la superficie (que reducen la repelencia) y una aceleración del proceso de mineralización que reduce las concentraciones de compuestos orgánicos (Blanco-Canqui y Lal, 2009).

Cuando se establecieron las parcelas con los diferentes tratamientos agrícolas, el contenido medio de materia orgánica de estos suelos era del 2%. En la tabla 4 se aprecia que la materia orgánica ha aumentado en algunas parcelas, aunque el incremento no ha sido muy elevado debido a que han pasado solo 4 años. De hecho, la incorporación de la materia orgánica en el suelo es un proceso lento y, según Marinari *et al.*, (2006) después de 7 años de agricultura ecológica, con una frecuencia de labrado tres veces menor que la no ecológica, no existen todavía cambios en el carbono orgánico total, aunque si que los hay en las condiciones nutricionales y la masa microbiológica. En el estudio de Blanco-Canqui y Lal (2009), algunas de las parcelas no labradas durante 30 años presentan contenidos elevados en materia orgánica elevada incluso en profundidad. No obstante, aunque en nuestro caso, el aumento de la materia orgánica sea relativamente pequeño, si que se aprecian sus consecuencias en el incremento de la repelencia al agua. Parece que la presencia de una capa de material vegetal continua (como los tratamientos de abono verde, NLAV; acolchado de paja, NLAP; y restos de poda, NLRP), aporta sustancias orgánicas al suelo que favorecen la aparición de repelencia (Doerr *et al.*, 2006). No obstante, la existencia de la repelencia al agua en el suelo no sólo depende de la cantidad de materia orgánica, sino del tipo y estado de descomposición, y de otros factores como la textura y el tipo de suelo, el tipo de cubierta vegetal, los microorganismos existentes y grado de humedad del suelo (Doerr *et al.*, 2000).

La mayoría de estudios sobre repelencia han sido realizados en suelos forestales (Doerr *et al.*, 2006a; Cerdà y Doerr, 2007). Esta mayor frecuencia y persistencia de la repelencia al agua puede atribuirse a la mayor cantidad de hojarasca sobre el suelo durante más tiempo, más contenido de materia orgánica (tabla 4) y una consecuente mayor actividad microbiana y de hongos que liberan sustancias hidrofóbicas (Doerr *et al.*, 2000). Sin embargo, la ocurrencia de la repelencia al agua en suelos calcáreos mediterráneos es menor comparada con otros estudios en suelo ácidos (Mataix-Solera y Doerr, 2004; Mataix-Solera *et al.*, 2007).

#### 4.2. Variabilidad espacial de la repelencia al agua a micro escala

En los resultados obtenidos se observa cómo la repelencia al agua es discontinua. En un área de 10 x 10 cm con el mismo uso del suelo, existen valores de la persistencia de la hidrofobicidad muy variados. La variabilidad de la repelencia en estas escalas está influenciada por la distribución espacial de la materia orgánica hidrofóbica en el suelo. Esta distribución de la materia orgánica normalmente disminuye con la profundidad (Doerr y Moody, 2004) y raras veces se ha encontrado repelencia a más de 0,5 m, como en el caso en dunas en los Países Bajos (Dekker y Ritsema, 1994). En este trabajo, sólo existe repelencia al agua en superficie en suelos agrícolas.

En suelos quemados, la repelencia al agua varía espacialmente, además de por los motivos comentados, según las temperaturas alcanzadas en el suelo durante el incendio y a su duración. Temperaturas entre 175-207°C intensifican la repelencia al agua y mayores la destruyen (DeBano *et al.*, 1976). Sin embargo, las temperaturas alcanzadas en el suelo y su duración durante un incendio no suelen ser homogéneas y dependen de varios factores, principalmente de: la distribución, densidad y tipo de vegetación; la cantidad de materia orgánica, textura y humedad del suelo; la topografía, orientación y las condiciones climáticas durante el incendio (Neary *et al.*, 1999). Así, si la temperatura alcanzada en el suelo se distribuye irregularmente, esto se verá reflejado en la repelencia del suelo.

#### 4.3. Variabilidad temporal. Evolución de la repelencia al agua tras un incendio

Se sabe relativamente poco sobre los procesos que controlan la duración temporal de la repelencia, parece que no existe un patrón exacto de sus cambios. Tras incendios forestales, la evolución temporal depende de si el incendio ha modificado, inducido o destruido la repelencia al agua inicial y de la evolución del ecosistema tras el incendio. La mayoría de los estudios indican que el incremento de la repelencia al agua debido al calentamiento del suelo, puede permanecer desde unos meses hasta varios años (Doerr y Shakesby, 2009). Huffman *et al.* (2001) indican que la repelencia inducida por un incendio persistió dos años en un bosque de pinos en Colorado, mientras que en otra zona próxima afectada por un incendio de alta intensidad, la repelencia volvió a las condiciones anteriores en un año (MacDonald y Huffman, 2004). En el trabajo de Tessler *et al.* (2008) en el Mt Carmel (Israel), se observa que la repelencia al agua intensificada por un incendio de moderada severidad, desapareció 8 meses después del incendio. Giovannini *et al.*, (1987) sugiere que la repelencia inducida por el fuego dura menos de 3 años. Como caso diferente, en un incendio de alta severidad en un bosque de *Pinus halepensis* en Serra Grossa (Valencia), Cerdà y Doerr (2005) no encontraron repelencia al agua hasta el octavo año después del fuego. En este incendio, las altas temperaturas alcanzadas eliminaron la repelencia al agua que existía previamente.

En el presente trabajo, el incendio de 2008 (I08) indujo repelencia al agua en el suelo en superficie y en profundidad, ya que los niveles son mayores que en la zona quemada en 1979, utilizada como control (I79). En el año siguiente al incendio, este suelo

presenta una reducción completa de la repelencia al agua en superficie, pero se mantiene a 1 cm de profundidad, aunque con menor persistencia que en 2008. Por otro lado, las zonas forestales incendiadas en 1979 y 1999 no muestran ninguna variación de la repelencia entre 2008 y 2009. Algunos de los mecanismos que pueden haber influido en la desaparición de la repelencia al agua un año tras el incendio de 2008, también identificados en otras zonas por Hubbert y Oriol (2005) y Doerr y Shakesby (2009), son: movimiento del suelo y cenizas tras episodios de lluvias en otoño, movimientos del suelo por bioturbación de hormigas, lavado de compuestos hidrofóbicos en profundidad, falta de nueva hojarasca y vegetación que aporten sustancias hidrofóbicas y ciclos de congelación-descongelación durante el invierno. La repelencia al agua en esta zona se puede restablecer con el tiempo con el aporte de mayor cantidad de materia orgánica fresca, como posiblemente ha ocurrido en la zona incendiada en 1999 (199), cuyo nivel de repelencia es ligero, hasta alcanzar los valores de repelencia de la zona incendiada en 1979 correspondientes a un bosque ya casi maduro.

#### 4.4. Implicaciones hidrológicas y de gestión

La repelencia al agua cuantificada en este trabajo en suelos agrícolas es baja. Bodí y Cerdà (2008), Cerdà y Bodí (2008), García-Orenes *et al.* (2009) y datos todavía no publicados demuestran que los efectos de la repelencia al agua en estas mismas parcelas no labradas es imperceptible en cuanto a la producción de escorrentías y erosión. Las parcelas con mayores escorrentías son las tratadas con herbicidas y la agrogeotextil, 5% y 11% respectivamente en 2004. El agrogeotextil era hidrofóbico al inicio de su instalación como demostraron Giménez Morera *et al.*, (2010), si bien durante las mediciones realizadas por cinco años después son hidrofílicos. En el resto de tratamientos agrícolas el coeficiente de escorrentía no superó el 1%. El valor más alto en la concentración de sedimentos se ha registrado en los suelos labrados en los que no se ha incorporado abono verde ( $< 7 \text{ g l}^{-1}$ ) y le siguen los tratamientos con herbicidas ( $2.73\text{-}4.27 \text{ gr l}^{-1}$ ). Sólo los suelos tratados mediante estrategias de agricultura de conservación, muestran concentraciones de sedimentos inferiores a  $< 1 \text{ g l}^{-1}$ . Respecto a las tasas de erosión, las parcelas de herbicida presentan las mayores tasas en todas las condiciones ( $1.91\text{-}3.17 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). El resto de parcelas presentan tasas de erosión bajas ( $< 0,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) a excepción de la parcela labrada. Estos resultados se corresponden también con los de Lasanta *et al.* (2000).

En suelos forestales, la repelencia medida es mayor que en suelos agrícolas y se registra incluso repelencia severa. En zonas calcáreas de la provincia de Valencia, Cerdà y Doerr (2005) y Cerdà y Doerr (2007) han detectado, mediante experimentos con lluvia simulada a pequeña escala, coeficientes de escorrentía del 27% o 31% de promedio bajo cubierta pino en verano con suelos secos, mostrando un comportamiento característico de los suelos repelentes e inverso a los otros suelos bajo matorral o agrícolas, que producen mayores escorrentías cuando el suelo está húmedo. Según los anteriores autores, en estos suelos calcáreos mediterráneos, la repelencia al agua es espacialmente discontinua, con zonas de suelo hidrofóbico e hidrofílico que se alterna con macroporos. La distribución de estas superficies determinará el perfil de humectación, el flujo de agua en los macroporos, la aparición de flujos preferentes o concentrados y que la repelencia

no afecte la escorrentía a escala de ladera (Doerr y Moody, 2004; Leighton-Boyce *et al.*, 2007). Por tanto, los efectos de la repelencia a escala de ladera o cuenca no parecen ser un problema en zonas de vegetación densa de pinos y matorral mediterráneo, pero pueden ser más serios sus efectos en el periodo inmediato tras un incendio forestal donde no existe vegetación ni capa de hojarasca, y donde normalmente el factor limitante para el crecimiento de la vegetación es el agua.

## **5. Conclusiones**

Este estudio cuantifica la ocurrencia y persistencia de la repelencia al agua en suelos con distintos manejos agrícolas y distintas recurrencias de incendios en zonas forestales en la Sierra de Enguera. Se demuestra que la repelencia al agua aparece con mayor frecuencia y persistencia en suelos forestales, y en menor medida en suelos agrícolas no labrados. Es inexistente en suelos labrados. En suelos forestales, la repelencia al agua disminuye al cabo de un año tras el incendio, pero parece que, como indican los resultados de las parcelas estudiadas, ésta se restablece a medida que se recupera la vegetación y se aportan restos orgánicos a la superficie del suelo. En los suelos agrícolas, el no laboreo induce cambios en la repelencia al agua del suelo respecto a suelos labrados o tratados con herbicidas debido a la presencia de abundante biomasa sobre el suelo y la reducida remoción y mezcla del suelo. En efecto, las parcelas de no labrado incrementaron en cuatro años sus niveles de materia orgánica respecto las parcelas con herbicida o labrado. Esta repelencia al agua, de momento no produce efectos en las tasas de escorrentía y erosión del suelo, que en cambio son más elevadas en el resto de parcelas. De manera similar, los valores obtenidos de repelencia al agua en suelos forestales, aunque más elevados que en suelos agrícolas, parece no provocar el aumento de escorrentía y pérdidas de suelo a escala de ladera, pero podrían adquirir protagonismo en la hidrología del suelo cuando la vegetación desaparece, como ocurre tras un incendio forestal.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que con el abandono del campo se produce un aumento de la repelencia de los suelos que es paralela al aumento de la materia orgánica. Sin embargo, y como confirman otros estudios en campos de cultivo, el aumento de la repelencia no supone un aumento de las escorrentías ni de la pérdida de suelo a escala de parcela. Si compromete esta repelencia la fertilidad del suelo, la redistribución del agua en el suelo y la formación de flujos preferentes subsuperficiales es un tema de investigación a desarrollar en las próximas décadas.

## **Agradecimientos**

Se agradece a María Burguet Marimón, Miguel Segura Sempere, Jorge Pauls y a los compañeros de la Universidad Miguel Hernández su ayuda en el trabajo de campo y el laboratorio. Este trabajo no habría sido posible sin la financiación de la beca FPU del Ministerio de Ciencia e Innovación y el proyecto CGL2008-02879/BTE. Se agradece a Enric Mateu y Fermin Poquet su colaboración en el mantenimiento de la Estación Experimental.

## Referencias bibliográficas

- ARCENEGUI, V., MATAIX-SOLERA, J., GUERRERO, C., ZORNOZA, R., MAYORAL, A. M., MORALES, J. (2007). Factors controlling the water repellency induced by fire in calcareous Mediterranean forest soils. *European Journal of Soil Science*, 58: 1254-1259.
- ARNÁEZ, J., LASANTA, T., ERREA, M. P., ORTIGOSA, L. (2011). Land abandonment, landscape evolution and soil erosion in a Spanish Mediterranean mountain region: the case of Camero Viejo. *Land Degradation and Development*, 22: 537-550.
- BENTLEY, J. R., FENNER, R. L. (1958). Soil temperatures during burning related to post-fire seedbeds on a woodland range. *Journal of Forestry*, 56: 737-740.
- BISDOM, E. B. A., DEKKER, L. W., SCHOUTE, J. F. T. (1993). Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and structure. *Geoderma*, 56: 105-118.
- BLACKWELL, P. S. (2000). Management of water repellency in Australia, and risks associated with preferential flow, pesticide concentration and leaching. *Journal of Hydrology*, 231-232: 384-395.
- BLANCO-CANQUI, H., LAL, R. (2009). Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma*, 149: 171-180.
- BODÍ, M. B., CERDÀ, A. (2008). La estación experimental para el estudio y degradación de los suelos de el Teularet-Sierra de Enguera. En: *Erosión y degradación del suelo agrícola en España* (Cerdà, A., Ed.). Cátedra de divulgación de la ciencia, Universitat de Valencia, Valencia, pp. 209-238.
- CERDÀ, A., DOERR, S. H. (2005). Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 423-437.
- CERDÀ, A., DOERR, S. H. (2007). Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils. *Hydrological Processes*, 21: 2325-2336.
- CERDÀ, A., BODÍ, M. B. (2008). Erosión y degradación de los suelos en los olivares del Macizo del Caroig. En: *La sustentabilidad del olivar en el macizo del Caroig. Prácticas sustentables y estrategia comercial de su aceite*. Sociedad de Agricultura Ecológica del Macizo del Caroig, Macizo del Caroig Asociación, pp. 117-143.
- CERDÀ, A., DOERR, S. H. (2008). The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74: 256-263.
- DEBANO, L. F., SAVAGE, S. M., HAMILTON, D. A. (1976). The transfer of heat and hydrophobic substances during burning. *Soil Science Society of America Journal*, 40: 779-782.
- DEBANO, L. F. (1981). *Water repellent soils: a state-of-the-art*. United States Department of Agriculture, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley (California), 21 pp.

- DEKKER, L. W., RITSEMA, C. J. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil. 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30: 2507-2517.
- DEKKER, L. W., RITSEMA, C. J., WENDROTH, O., JARVIS, N., OOSTINDIE, K., POHL, W., LARSSON, M., GAUDET, J. P. (1999). Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany. *Journal of Hydrology*, 215: 4-22.
- DOERR, S. H. (1998). On standarizing the “Water Drop Penetration Time” and the “Molarity of an Ethanol Droplet” techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 663-668.
- DOERR, S. H., SHAKESBY, R. A., WALSH, R. P. D. (1998). Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucaliptus and pine forests, Portugal. *Soil Science*, 14: 163.
- DOERR, S. H., SHAKESBY, R. A., WALSH, R. P. D. (2000). Soil Water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth Science Reviews*, 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. *Journal of Hydrology*, 231-232: 134-147.
- DOERR, S. H., MOODY, J. A. (2004). Hydrological impacts of soil water repellency: on spatial and temporal uncertainties. *Hydrological Processes*, 18: 829-832.
- DOERR, S. H., SHAKESBY, R. A., DEKKER, L. W., RITSEMA, C. J. (2006). Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in a humid temperate climate. *European Journal of Soil Science*, 57: 741-754.
- DOERR, S. H., SHAKESBY, R. A. (2009). Soil Water repellency. Principles, causes and relevance in fire-affected environments. En *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España* (CERDÀ, A. Mataix-Solera, J., eds.). Cátedra de divulgación de la ciencia. Universitat de Valencia, Valencia, pp. 57-75.
- DOERR, S. H., SHAKESBY, R. A., MACDONALD, L. H. (2009). Soil Water repellency: A key factor in post-fire erosion. En *Fire effects on Soils and Restoration Strategies. Land reconstruction and Management* (Cerdà, A., Robichaud, P. R., eds.). Science Publishers, pp. 373-398.
- FRANCO, C. M. M., CLARKE, P. J., TATE, M. E., OADES, J. M. (2000). Hydrophobic properties and chemical characterisation of natural water repellent materials in Australian sands. *Journal of Hydrology*, 231-232: 47-58.
- GARCÍA-ORENES, F., CERDÀ, A., MATAIX-SOLERA, J., GUERRERO, C., BODÍ, M. B., ARCENEGUI, V., ZORNOZA, R., SEMPERE, J. G. (2009). Effects of agricultural management on surface soil properties and soil-water losses in eastern Spain. *Soil and Tillage Research*, 106: 117-123.
- GARCÍA RUIZ, J. M. (2010). The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*, 81: 1-11.

- GARCÍA RUIZ, J. M., LASANTA, T. (1990). Land-use changes in the Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 10: 267-279.
- GARCÍA RUIZ, J. M., VALERO, B. (1998). Historical geomorphic processes and human activities in the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 18: 309-320.
- GARCÍA RUIZ, J. M., LASANTA, T., ORTIGOSA, L., RUIZ FLAÑO, P., MARTÍ, C., GONZÁLEZ, C. (1995). Sediment yield under different land-uses in the Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 15: 229-240.
- GIOVANNINI, G., LUCCHESI, S., CERVELLY, S. (1987). The natural evolution of a burnt soil: a three-year investigation. *Soil Science*, 137: 220-226.
- GIMÉNEZ MORERA, A., RUIZ-SINOGA, J. D., CERDÀ, A. (2010). The impact of cotton geotextiles on soil and water losses in Mediterranean rainfed agricultural land. *Land Degradation and Development*, 21: 210-217.
- GONZÁLEZ-VILA, F. J., ALMENDROS, G., GONZALEZ-PEREZ, A., KNICKER, H., GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, R., HERNÁNDEZ, Z., PIEDRA-BUENA, A., DE LA ROSA, J. M. (2009). Transformaciones de la materia orgánica del suelo por incendios naturales y calentamientos controlados en condiciones de laboratorio. En: *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. Cátedra de divulgación de la ciencia* (Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Eds.). Universitat de Valencia, Valencia, pp. 219-267.
- HALLETT, P. D., BAUMGARTL, T., YOUNG, I. M. (2001). Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 184-190.
- HUBBERT, K. R., ORIOL, V. (2005). Temporal fluctuations in soil water repellency following wildfire in chaparral steplands, southern California. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 439-117.
- HUFFMAN, E. L., MACDONALD, L. H., STEDNICK, J. D. (2001). Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range. *Hydrological Processes*, 15: 2877-2892.
- JAMISON (1947). Resistance of wetting in the surface of sandy soils under citrus trees in central Florida and its effect upon penetration and the efficiency of irrigation. *Soil Science Society of America Proceedings*, 11: 103-109.
- KEELEY, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18: 116-126.
- KEIZER, J. J., DOERR, S. H., MALVAR, M. C., PRATS, S. A., FERREIRA, R. S. V., OÑATE, M. G., COELHO, C. O. A., FERREIRA, A. J. D. (2008). Temporal variation in topsoil water repellency in two recently burnt eucalypt stands in north-central Portugal. *Catena*, 74: 192-204.
- LASANTA, T., VICENTE-SERRANO, S. M. (2007). Cambios en la cubierta vegetal en el Pirineo Aragonés en los últimos 50 años. *Pirineos*, 162: 125-1254.

- LASANTA, T., GARCÍA RUIZ, J. M., PÉREZ RONTOMÉ, C., SANCHO, C. (2000). Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: The effect of land management after farmland abandonment. *Catena*, 38: 265-278.
- LASANTA, T., PÉREZ RONTOMÉ, C., GARCÍA RUIZ, J. M., MACHÍN, J., NAVAS, A. (1995). Hydrological problems derived from farmland abandonment in semi-arid environments: The Central Ebro Depression. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20: 309-314.
- LEIGHTON-BOYCE, G., DOERR, S. H., SHAKESBY, R. A., WALSH, R. P. D. (2007). Quantifying the impact of soil water repellency on overland flow generation and erosion: a new approach using rainfall simulation and wetting agents on in situ soils. *Hydrological Processes*, 21: 2337-2345.
- MACDONALD, L. H., HUFFMAN, E. L. (2004). Post-fire soil water repellency: persistence and soil moisture thresholds. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 1729-2734.
- MARINARI, S., MANCINELLI, R., CAMPIGLIA, E., GREGO, S. (2006). Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecological Indicators*, 6: 701-711.
- MATAIX-SOLERA, J., DOERR, S. H. (2004). Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma*, 118: 77-88.
- MATAIX-SOLERA, J., ARCENEGUI, V., GUERRERO, C., MAYORAL, A. M., MORALES, J., GONZÁLEZ, J., GARCÍA-ORENES, F., GÓMEZ, I. (2007). Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid Mediterranean environment. *Hydrological Processes*, 21: 2300-2309.
- MATAIX-SOLERA, J., GARCÍA-IRLES, L., MORUGÁN, A., DOERR, S. H., GARCIA-ORENES, F., ARCENEGUI, V., ATANASSOVA I. (2011). Longevity of soil water repellency in a former wastewater disposal tree stand and potential amelioration. *Geoderma*, 165: 332-337
- NEARY, D. G., KLOPATEK, C., DEBANO, L. F., FFOLIOTT, P. F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 122: 51-71.
- NELSON, D. H. W., SOMMERS, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. En: *Methods of soil analysis. Part II. Chemical and Microbiological Properties*. (Page, A.L., Miller, R.H. Keeney, D.R., Eds.). American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 539-580.
- RITSEMA, C. J., DEKKER, L. W. (2000). Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *Journal of Hydrology*, 231-232: 308-319.
- SAVAGE, S. M., OSBORN, J., LETEY, J., HEATON, C. (1972). Substances contributing to fire-induced water repellency in soils. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 36: 674-678.

- SHAKESBY, R. A., DOERR, S. H., WALSH, R. P. D. (2000). The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *Journal of Hydrology*, 231-232: 178-191.
- SOIL SURVEY STAFF (2006). *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture, National Resources Conservation Services, Washington D.C.
- TESSLER, N., WITTENBERG, L., MALKINSON, D., GREENBAUM, N. (2008). Fire effects and short-term changes in soil water repellency-Mt Carmel, Israel. *Catena*, 74: 185-191.
- VICENTE SERRANO, S. M., LASANTA, T., CUADRAT, J. M. (2000). Transformaciones en el paisaje del Pirineo como consecuencia del abandono de las actividades económicas tradicionales. *Pirineos*, 155: 111-113.
- WALLACH, R., BEN-ARIE, O., GRABER, E. R. (2005). Soil water repellency induced by long-term irrigation with treated sewage effluent. *Journal of Environmental Quality*, 34: 1910-1920.
- YORK, C. A. (1993). A questionnaire survey of dry patch on golf courses in the United Kingdom. *Journal of Sports Turf Research*, 69: 20-26.
- ZAVALA, L. M., GONZÁLEZ, F. A., JORDÁN, A. (2009). Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain. *Geoderma*, 152: 361-374.