



# 2.4

## **Repelencia al agua en suelos afectados por incendios: métodos sencillos de determinación e interpretación**

Antonio Jordán<sup>1</sup>, Lorena M. Zavala<sup>1</sup>, Félix A. González<sup>1</sup>, Gema Bárcenas-Moreno<sup>1</sup> y Jorge Mataix-Solera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química (Universidad de Sevilla), C/ Profesor García González, 1, 41012, Sevilla. [ajordan@us.es](mailto:ajordan@us.es)

<sup>2</sup>GEA (Grupo de Edafología Ambiental), Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n, Elche, Alicante.



## Repelencia al agua en suelos afectados por incendios: métodos sencillos de determinación e interpretación

Antonio Jordán<sup>1</sup>, Lorena M. Zavala<sup>1</sup>, Félix A. González<sup>1</sup>, Gema Bárcenas-Moreno<sup>1</sup> y Jorge Mataix-Solera<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Facultad de Química (Universidad de Sevilla), C/ Profesor García González, 1, 41012, Sevilla. [ajordan@us.es](mailto:ajordan@us.es)

<sup>2</sup> GEA (Grupo de Edafología Ambiental), Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente, Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n, Elche, Alicante.

### RESUMEN

La repelencia al agua es una propiedad de los suelos que reduce su capacidad de infiltración y que tiene importantes consecuencias hidrológicas y geomorfológicas. Es una propiedad que aparece frecuentemente tras el fuego, aunque también está asociada a distintos tipos de suelo en diferentes zonas y climas del mundo. En este texto se discute la importancia de la repelencia al agua de los suelos en relación con sus causas y efectos, y se proponen algunos métodos sencillos de determinación: la prueba o "test" de tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT), el test del porcentaje de etanol (TPE) o la determinación del ángulo de contacto constituyen medidas simples y poco costosas que pueden ser realizadas rápidamente para la determinación de la repelencia al agua del suelo. Este capítulo proporciona una guía de referencia para investigadores, estudiantes, técnicos y gestores sobre métodos sencillos de determinación de la repelencia al agua de los suelos y la interpretación de sus resultados. Los métodos descritos han sido empleados en estudios previos de suelos afectados por el fuego de manera general y son comúnmente aceptados por la mayoría de los investigadores, no requieren material de laboratorio complejo y su eficacia está avalada por artículos publicados en revistas científicas y por haber sido contrastados por distintos científicos. Debido a la sencillez y a bajo coste, las pruebas de repelencia al agua del suelo pueden ser utilizados como indicadores rápidos del impacto de los incendios en la calidad física de los suelos.

### INTRODUCCIÓN

La repelencia al agua es una propiedad de los suelos que reduce su afinidad por el agua (Figura 1). De este modo, la superficie de un suelo repelente al agua puede llegar a ofrecer una resistencia intensa a la humectación, lo que hace disminuir la infiltración del agua acumulada en la superficie, durante períodos de tiempo que pueden oscilar desde unos pocos segundos hasta horas, días o semanas (King, 1981; Dekker y Ritsema, 1994; Doerr y Thomas, 2000). Se ha demostrado la existencia de esta propiedad en diferentes tipos de suelo y bajo diferentes climas y tipos de vegetación de todo el mundo (por ejemplo: Wallis y Horne, 1992; DeBano, 2000a; Doerr et al., 2000; Jaramillo et al., 2000). La disminución de las tasas de infiltración del agua en el suelo como consecuencia de la repelencia tiene consecuencias hidrológicas y geomorfológicas inmediatas, a las que hay que añadir consecuencias sobre el crecimiento y supervivencia de las plantas (House, 1991; York, 1993). Al disminuir la tasa de infiltración en la superficie del suelo, la repelencia al agua contribuye a reducir el tiempo de generación de escorrentía y a intensificar el flujo superficial, lo



Figura 1. Detalle de una gota de agua sobre la superficie de un suelo repelente al agua. Foto: A.J.P. Granged, A. Jordán y L.M. Zavala.

que tiene a su vez otras consecuencias importantes como el aumento del riesgo de erosión, la irregularidad en el frente de mojado y el desarrollo de vías de flujo preferencial o el lavado acelerado de agroquímicos en el caso de sistemas agrícolas (Imeson et al., 1992; Shakesby et al., 1993; Ritsema et al., 1993, 1997; Doerr y Shakesby, 2009). No obstante, la repelencia al agua no siempre tiene efectos negativos. Blanco-Canqui y Lal (2009) citan, por ejemplo, el incremento en la estabilidad estructural (Blanco-Canqui et al., 2007) o el secuestro de carbono (Urbanek et al., 2007).

Las primeras aproximaciones al estudio de la repelencia en los suelos se produjeron de manera indirecta con anterioridad al siglo xx, aunque durante esta época se avanzó considerablemente en el estudio de las sustancias orgánicas del suelo (DeBano, 2000a). Ejemplos de repelencia al agua han sido recogidos desde 1917 (Schantz y Piemeisel, 1917), aunque el estudio de la repelencia al agua del suelo no se abordó de manera más intensa hasta la segunda mitad del siglo xx, con los trabajos de Jamison (1947), Van't Woudt (1959) o Domingo (1950). Entre 1960 y 1970 se produjo un incremento en la frecuencia de publicaciones científicas en torno a la repelencia al agua en suelos, haciéndose hincapié en su relación con los incendios forestales, y en el desarrollo y mejora de estrategias para las superficies repelentes al agua (DeBano, 1981). Durante las siguientes décadas, las investigaciones aumentaron de forma significativa, al ser evidente que la repelencia al agua, era un campo mucho más amplio de lo que previamente se creía. Se hicieron progresos durante este período que fueron recogidos en una revisión realizada por Wallis y Horne (1992). La investigación realizada hasta la actualidad ha mostrado que se trata de un proceso mucho más extendido de lo sospechado cuando se iniciaron este tipo de estudios, y hoy se sabe que la repelencia al agua del suelo es una propiedad común de una amplia variedad de suelos (Doerr et al., 2000). Se ha encontrado en todos los continentes, excepto en el antártico; bajo climas estacionales tropicales o subárticos; bajo tipos de uso como la agricultura intensiva o los bosques perennifolios; en suelos arcillosos o en suelos arenosos; en suelos muy secos o en suelos muy húmedos (Wallis y Horne, 1992; DeBano, 2000a; Doerr et al., 2000; Dekker y Ritsema, 1996a).

Aunque en numerosas investigaciones se ha observado repelencia al agua en suelos de manera natural (Jungerius y van der Meulen, 1988; Jungerius y de Jong, 1989; Witter et al., 1991; Ritsema et al., 1993; Dekker y Ritsema, 1994; Moral et al., 2002; Moral García et al., 2005), la mayor intensidad observada en suelos afectados por incendios respecto a los suelos no quemados ha sugerido que el fuego puede ser un agente capaz de inducir esta propiedad. Los efectos del fuego sobre la repelencia al agua del suelo pueden ser muy diferentes en función de las tempe-

raturas alcanzadas durante la combustión y de su tiempo de residencia. Muchos autores han comprobado que la repelencia al agua puede ser inducida en los suelos tras su exposición a altas temperaturas (DeBano y Krammes, 1966; DeBano 2000b; Doerr et al., 2005). Sin embargo, según DeBano et al. (1976), temperaturas superiores a 270 °C pueden destruir o debilitar la repelencia al agua previa a la acción del fuego. Después de estudiar los efectos del fuego sobre la variabilidad espacial y temporal de la repelencia al agua en suelos bajo matorrales de *Artemisia sp.*, Pierson et al. (2008) observaron que el grado de repelencia al agua del suelo se redujo tras incendios de alta severidad. DeBano et al. (1970) y Savage (1974) observaron que el fuego puede inducir repelencia al agua en suelos que previamente no la mostraban, así como reducirla o incrementarla en suelos que sí la mostraban. La dirección de estos cambios está ligada a la temperatura de la combustión, el tiempo de residencia del calor, la cantidad y el tipo de combustible y la humedad del suelo previa a la acción del fuego, así como el tipo de suelo (Doerr et al., 2000).

Aunque, a pesar de todo, la repelencia al agua en los suelos es un concepto aún mal comprendido, además de por su importancia como indicador del impacto causado por el fuego en los suelos, algunos autores han sugerido que por sus relaciones con otras propiedades del suelo y la facilidad de su determinación debería incluirse la descripción de la repelencia al agua en los análisis rutinarios del suelo como un indicador de su calidad física (Blanco-Canqui y Lal, 2009). En este capítulo se aborda el estudio de la repelencia al agua de los suelos y su papel como un indicador del impacto causado en los suelos por el fuego, revisando y describiendo algunos métodos sencillos para su determinación.

## PRINCIPIOS FÍSICOQUÍMICOS DE LA HIDROFOBICIDAD

El grado de afinidad o repelencia al agua de una superficie viene determinado por las propiedades químicas de su capa externa. Según Langmuir (1920), basta una capa monomolecular adsorbida de compuestos orgánicos polares para cambiar las propiedades de una superficie sólida (Figura 2). En la práctica, una pequeña proporción en el suelo de compuestos orgánicos hidrófobos es suficiente para inducir repelencia al agua (Ma'shum et al., 1988; McGhie y Posner, 1981; Jungerius y de Jong, 1989). Muchos autores han hecho hincapié en la capacidad de los ácidos húmicos de inducir repelencia al agua en el suelo (DeBano, 1981; Doerr et al., 1998; Roy y McGill, 2000), aunque el contenido de materia orgánica del agua del suelo repelente es muy baja (Jungerius y de Jong, 1989).

Aunque la relación de la hidrofobicidad con los recubrimientos orgánicos de los agregados o partículas del suelo está comúnmente aceptada en la actualidad, la caracterización y el estudio de estos recubrimientos orgánicos en relación con la hidrofobicidad mediante microscopía electrónica es difícil. Las causas de esta dificultad son, según Doerr et al. (2000), la interferencia que puede producir la presencia de partículas de diverso origen recubriendo también a los agregados y partículas del suelo, o bien la dificultad en la detección de recubrimientos muy delgados, como capas monomoleculares.

La repelencia al agua es un concepto confuso, ya que en teoría ninguna superficie ejerce repelencia sobre un líquido, pues siempre existe una cierta atracción entre las partículas de cuerpos

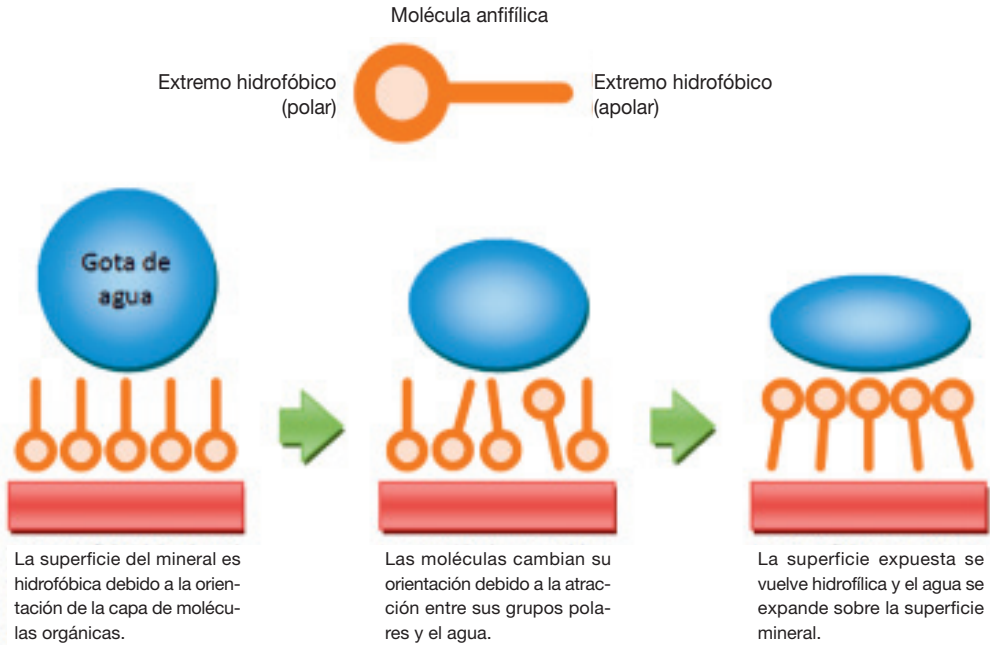
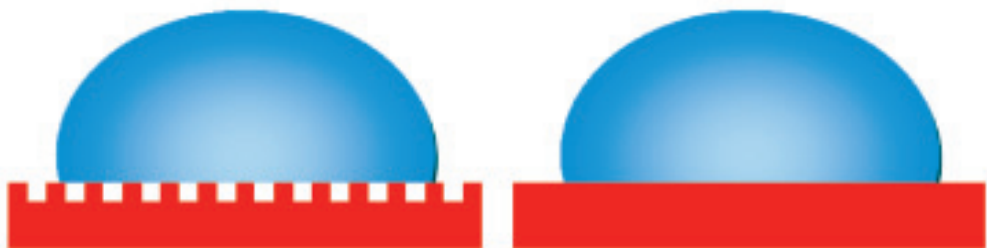


Figura 2. Representación esquemática de una molécula de carácter anfifílico (parte superior) y secuencia de cambios en la orientación de moléculas anfifílicas sobre una superficie mineral en contacto con el agua (a partir de Tschapek, 1984; Ma'shum y Farmer, 1985; Velmulpalli, 1993).

sólidos y líquidos. Según Tschapek (1984), excepto en el caso del sílice des-hidroxilado, todas las partículas minerales del suelo son hidrofílicas, ya que su superficie está normalmente recubierta por iones asociados y grupos polares hidroxílicos. En el caso de una superficie hidrofílica, el agua se muestra extendida sobre la superficie sólida, mientras que sobre una superficie hidrofóbica, el agua aparece formando gotas redondeadas y aisladas (Adam, 1963). Si la superficie es la de un medio poroso, como el suelo, la infiltración del agua puede verse inhibida. Cuando el agua entra en contacto con una superficie rugosa de estructura granular como es la superficie del suelo, una fracción de la superficie del agua estará en contacto con material sólido, y el resto en contacto con el aire entre los gránulos (Figura 3). El aire es muy hidrofóbico, de modo que una superficie porosa puede alcanzar un grado de hidrofobicidad mucho mayor que una superficie plana químicamente similar. Este fenómeno ha sido descrito como "superhidrofobicidad" (McHale et al., 2004). En el caso de arena o suelos repelentes al agua con porosidad apreciable, el agua puede ocupar este espacio, pero no recubrirá los granos de forma individual, mientras que en el caso de partículas hidrofílicas, éstas podrán cubrirse por una lámina de agua.

La afinidad o repelencia entre las superficies de agua y sólidos son originadas por las fuerzas atractivas (adhesión) y la atracción entre las moléculas de agua (cohesión). Para comprender mejor esas fuerzas, es necesario considerar algunas propiedades moleculares del agua.

Una molécula de agua está compuesta de un átomo de oxígeno con una carga parcial negativa y dos átomos de hidrógeno con una carga parcial positiva, unidos entre sí con una posición angular de  $105^\circ$ , lo que otorga a la partícula una fuerte estructura dipolar. La atracción entre polos con carga parcial positiva (hidrógeno) y negativa (oxígeno) causa que las moléculas de agua formen estructuras que se mantienen unidas por puentes de hidrógeno. De este modo, se forma una especie de retícula que Hillel (1998) denominó “polímero” de moléculas unidas por hidrógeno. Las interacciones entre los diferentes dipolos de cada molécula causan una fuerza de atracción asociada a una gran tensión superficial y un gran poder de adhesión. Los enlaces de hidrógeno que puede formar la molécula de agua son resistentes a la reorganización, lo que favorece esta propiedad frente a superficies que ofrezcan oxígenos expuestos con los que formar uniones (Kramer, 1974). El agua se adhiere a la mayoría de las superficies naturales, ya que estas están formadas por iones con carga negativa o positiva que atraen a los polos opuestos de cada molécula de agua. Sin embargo, la característica dipolar del agua también produce fuerzas relativamente fuertes que pueden neutralizar la atracción entre las cargas superficiales. Así, dentro de un líquido, la suma de fuerzas que actúan una molécula individual es cero, ya que se encuentra recubierta por otras moléculas y sus fuerzas de atracción/repulsión respectivas. Más allá de la superficie de un líquido, no existen moléculas similares para oponerse a la atracción ejercida por las moléculas que se encuentran dentro de él. Las fuerzas de atracción ejercidas por la fase gaseosa en contacto con el agua, por ejemplo, son menores que las ejercidas por las moléculas de agua entre sí, lo que genera una fuerza sobre la superficie líquida expuesta. Como consecuencia de esta fuerza, las moléculas de la superficie experimentan una atracción hacia el interior (tensión superficial) que tiende a reducir la superficie del cuerpo de agua y la distancia entre las moléculas en su interior. La suma de las fuerzas que actúan en la superficie del líquido se llama “tensión superficial”. Para incremen-



Una gota de agua depositada sobre un medio irregular se asienta en la topología y los vacíos entre las asperezas o rugosidades se llenan de aire, provocando un estado superhidrofóbico.

En este caso, una gota de agua forma una lámina sobre una superficie plana químicamente similar a la de la izquierda en un estado hidrofóbico.

Figura 3. Disposición de una gota de agua sobre una superficie hidrofóbica rugosa (estado superhidrofóbico) y una superficie hidrofóbica perfectamente plana.

tar la superficie de un líquido es necesario realizar un trabajo que está relacionado con su tensión superficial. La mayoría de los líquidos tienen una tensión superficial entre 20 y 40  $10^{-3}$  N  $m^{-1}$  a 20 °C. Sin embargo, en el caso del agua, esta tensión es excepcionalmente alta, llegando hasta 72,75  $10^{-3}$  N  $m^{-1}$ . Con el incremento de la temperatura, la tensión superficial de los líquidos se reduce (Parker, 1987).

Los mismos principios pueden aplicarse a las superficies de los sólidos, aunque su naturaleza inhibe la deformación esférica. Así, la tensión superficial de los sólidos mantiene las fuerzas laterales en la superficie. La tensión superficial para sólidos duros varían entre los 0,5 y 5 N  $m^{-1}$ , aumentando proporcionalmente con su estabilidad y su punto de fusión (Zisman, 1964). Cuando un líquido moja una superficie sólida se extiende sobre ella, de modo que las fuerzas de cohesión entre las moléculas del líquido se debilitan, pues parte de ellas se transforman en fuerzas de adhesión en la interfase líquido-sólido. En este caso, las fuerzas de adhesión son superiores a las de cohesión. Si las fuerzas de cohesión son dominantes, el líquido tenderá a asumir una forma esférica en forma de gota. De este modo, las superficies con una tensión superficial mayor a 72,75  $10^{-3}$  N  $m^{-1}$  atraerán al agua y, por tanto, pueden considerarse como hidrofílicas. Los principales tipos de suelos minerales tienen una tensión superficial mucho más alta que la del agua y, por lo tanto, son suelos hidrofílicos (Tschapek, 1984); mientras que algunas sustancias orgánicas, tales como las ceras o los polímeros orgánicos, pueden tener una tensión superficial con valores energéticos menores a 72,75  $10^{-3}$  N  $m^{-1}$ , y, por lo tanto, son hidrofóbicos (Zisman, 1964).

La temperatura es un factor que afecta fuertemente a la tensión superficial. Según Stephens (1996), cuando la temperatura se incrementa de 10 a 30 °C, la tensión superficial del agua en contacto con el aire pasa de 74,22 a 71,18 dinas  $cm^{-1}$ . La tensión superficial aumenta también con la presencia de sales en solución, ya que los electrolitos incrementan las fuerzas de cohesión en el seno del líquido.

Cuando se coloca una gota de un líquido sobre la superficie de un sólido, cada fase presente (sólida, líquida o gaseosa) posee su propia tensión superficial. Como resultado, en el punto de la triple interfase se forma un ángulo de contacto cuyo valor dependerá de las propiedades de cada fase. Según la ley de Young-Laplace, el ángulo de contacto sólido/agua es mayor de 90° cuando la superficie sólida es hidrófoba, y menor cuando es hidrófila, lo que tradicionalmente se ha mantenido como criterio en el caso de los suelos (ver DeBano et al., 2005). Sin embargo, se ha demostrado que la infiltración puede ocurrir incluso con ángulos mayores de 90°, y que un suelo puede ser repelente al agua incluso con ángulos de contacto menores de 90° (Shirtcliffe et al., 2006). El límite de 90° se basa en el principio de que un medio poroso se comporta de forma similar a un conjunto de tubos capilares. Sin embargo, esta aproximación es muy pobre en el caso de un suelo, formado por partículas discretas de distinta forma, tamaño y naturaleza química. Shirtcliffe et al. (2006) demostraron experimentalmente que el ángulo límite para que una gota de hexano o heptano se infiltrase en una superficie formada por partículas de arena recubiertas con fluorocarbono era de hasta 61-65°. Se ha observado también que otras sustancias pueden infiltrarse con ángulos de contacto incluso menores, como 52-61° (pentano y hexano sobre esferas de vidrio recubiertas de fluorocarbono; Shirtcliffe et al., 2006) ó 49,5-57,7° (etanol sobre lecho de partículas de azufre, poliamida y politetrafluoroetano; Bán et al., 1987). De este



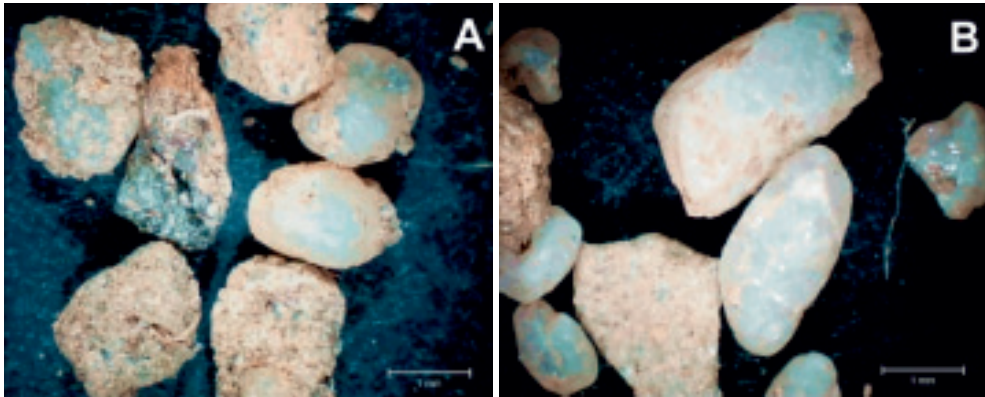


Figura 4. A: partículas de arena del horizonte superior de un suelo no quemado, mostrando recubrimientos de partículas finas y materia orgánica; B: partículas de arena del mismo suelo, después del efecto de un fuego intenso simulado en laboratorio, mostrando algunos recubrimientos de partículas finas, pero en el que ha desaparecido el recubrimiento de partículas orgánicas tras la combustión. Fotografía: A. Jordán.

modo, la idea comúnmente aceptada de que un líquido puede infiltrarse sólo cuando el ángulo de contacto es menor de  $90^\circ$  es falsa en el caso de sustratos física y químicamente similares a la arena, y, por lo tanto, en el de los suelos.

En teoría, una sencilla capa de moléculas hidrofóbicas pueden dar a una superficie mineral una superficie repelente al agua (Zisman, 1964). Sin embargo, los componentes hidrofóbicos tienden a ser absorbidos como pequeños góbulos y no como una capa uniforme (Figura 4). De esa manera, una determinada cantidad de glóbulos de este tipo puede recubrir completamente un grano mineral. Por ejemplo, durante un experimento de laboratorio, Ma'shum et al. (1988) logró extraer compuestos hidrofóbicos de muestras de suelo y las añadió posteriormente a muestras de arena lavada, logrando inducir un grado de repelencia similar al de los suelos originales con una proporción de sólo 0,35 g de componentes hidrofóbicos extraídos por cada 1000 g de arena lavada.

La observación de los recubrimientos de sustancias hidrofóbicas al microscopio no ha proporcionado aún resultados consistentes (Doerr et al., 2000). Esto puede deberse a distintas causas, como el recubrimiento con partículas o sustancias de distinto origen y con distintos grados de hidrofobicidad, o la presencia de capas de un grosor de tamaño molecular con alto grado de hidrofobicidad, pero no observables fácilmente incluso con microscopía electrónica. En general, tras el efecto de un fuego intenso con elevadas temperaturas, puede suponerse que el recubrimiento de partículas orgánicas se ve reducido o eliminado por la combustión, pero a determinadas temperaturas podrían incluso aparecer al condensar compuestos orgánicos volatilizados sobre una superficie algo más fría.

La repelencia al agua también puede estar causada por la presencia de materiales finos intersticiales. Bisdorn et al. (1993) sugirieron que la presencia de sustancias hidrofóbicas en la matriz del suelo puede causar repelencia al agua, pero que un grado extremo de repelencia se origina debido al recubrimiento de las partículas individuales y microagregados.

## ORIGEN DE LAS SUSTANCIAS HIDROFÓBICAS EN EL SUELO

Aunque aún no se posee un conocimiento exhaustivo de las sustancias capaces de inducir hidrofobicidad en los suelos (Doerr et al., 2000; Doerr y Shakesby, 2009), sí se sabe que la mayoría de tales sustancias son abundantes en los ecosistemas y son liberadas al suelo, como por ejemplo exudados de raíces (Dekker y Ritsema, 1996a; Doerr et al., 1998), de la fauna del suelo, hongos y otros microorganismos (Hallett y Young, 1999 ; Schaumann et al., 2007), o directamente como restos orgánicos en descomposición (McGhie y Posner, 1981). Se ha sugerido que estos compuestos son sustancias anfífilas que sólo causan hidrofobicidad cuando ocurren determinados tipos de interacción molecular con la superficie de la fase sólida del suelo a través de sus grupos funcionales polares o iónicos (Roy y McGill, 2000; Morley et al., 2005), que a su vez es influenciada por las propiedades físicas y químicas del suelo (Doerr et al., 2000 ; Graber et al., 2009).

Las principales sustancias orgánicas capaces de inducir repelencia al agua en los suelos pueden dividirse en dos grupos principales: hidrocarburos alifáticos y sustancias polares con estructura anfífilas. Los primeros están formados por cadenas hidrocarbonadas largas. Se trata de compuestos no polares y son insolubles en agua. Un segundo grupo está formado por cadenas hidrocarbonadas que poseen un extremo polar hidrofílico y otro extremo hidrofóbico. A pesar de ser generalmente solubles en agua, las moléculas anfífilas pueden formar recubrimientos hidrofóbicos. Se cree que ambos grupos pueden inducir repelencia al agua en los suelos (McIntosh y Horne, 1994), pero las moléculas polares (por ejemplo: ácidos grasos y determinadas ceras, como ésteres y sales de ácidos grasos) parecen ser los principales constituyentes de las cubiertas hidrofóbicas sobre partículas minerales, como han observado varios autores (Ma'shum et al., 1988; Hudson et al., 1994; Franco et al., 2000).

Entre las formas químicas más frecuentes se encuentran alcanos y alquenos (procedentes de bacterias, hongos, algas y plantas superiores), terpenoides (algunas ceras de plantas), monocetonas (de bacterias y plantas superiores), dicetonas (de eucaliptos), poliéster de ácidos grasos (de coníferas). No obstante, la presencia de estos compuestos no implica siempre la repelencia al agua del suelo, ya que se ha demostrado que cantidades apreciables de estos compuestos también pueden encontrarse en suelos de carácter hidrofílico (Doerr et al., 2005; Morley et al., 2005). La identificación de los compuestos específicos que causan la repelencia al agua ha sido uno de los objetivos de las investigaciones en las últimas décadas. Franco et al. (2000) describieron la presencia de ceras en suelos arenosos capaces de inducir repelencia al agua. Otros trabajos interesantes son los realizados por Franco et al. (1995), Horne y McIntosh (2000), Hudson et al. (1994), Ma'shum et al. (1988), McIntosh y Horne (1994), Morley et al. (2005), o Roy et al. (1999).

### La vegetación

En muchos estudios, la aparición de la repelencia al agua se ha asociado a determinados tipos de organismos. Sin embargo, no se puede asumir que una determinada especie siempre induzca repelencia al agua bajo condiciones naturales. Se ha observado, por ejemplo, repelencia al agua desarrollada en suelos bajo eucalipto (*E. globulus*) y pino (*P. pinaster*) en el noroeste de España (Benito et al., 2003), como responsable en parte de altas tasas de erosión. Sin embargo, esta

repelencia se ha desarrollado como resultado del clima relativamente húmedo y templado, además de la presencia de estas especies (Conde et al., 1995; Hafizoglu et al., 2002; Rodríguez-Alleres et al., 2007).

Las especies vegetales que más comúnmente se asocian con la repelencia al agua son árboles perennes con una considerable cantidad de resinas, ceras o aceites aromáticos, como ocurre en el caso de eucaliptos y pinos. La repelencia al agua también se ha encontrado bajo especies arbustivas en áreas templadas (Mallik y Rahman, 1985), matorral mediterráneo (Mallik y Rahmann, 1985; Giovannini et al., 1987; Jordán et al., 2008; Jordán et al., 2010) u otros tipos de bosque en condiciones de clima semi-desértico (DeBano, 1991). La repelencia al agua en suelos ha sido descrita por varios autores en suelos bajo pinos (Mataix-Solera y Doerr, 2004; Hubbert et al., 2006; Lewis et al., 2006), alcornoques (Sevink et al., 1989; Jordán et al., 2008) y otras especies de *Quercus* (Cerdà et al., 1998; Mataix-Solera et al., 2007), y árboles de hoja caduca (Reeder y Jurgensen, 1979; Buczko et al., 2002).

Además, hay que tener presentes otros condicionantes. Los suelos naturales bajo bosques de eucalipto muestran en general una repelencia al agua muy intensa (Shakesby et al., 1993). Sin embargo, suelos bajo pino muestran este mismo grado de repelencia sólo tras la acción del fuego (Letey, 2001). El material litológico también puede potenciar o disminuir la intensidad de la repelencia al agua en suelos bajo pino (Mataix-Solera y Doerr, 2004; Cerdà y Doerr, 2007). Jordán et al. (2009) estudiaron la repelencia al agua en suelos bajo tipos de vegetación similares sobre diferentes sustratos volcánicos y encontraron diferencias significativas (Figura 5). Sin embargo, factores como la descomposición natural y la incorporación de las sustancias resultantes en el suelo han sido menos estudiados, aunque existen diversos trabajos sobre este tema (Roberts y Carbon, 1972; Reeder y Juergensen, 1979; McGuie y Posner, 1981). El mecanismo de entrada de las sustancias hidrofóbicas en el suelo no está aún bien descrito, aunque sí se sabe que la hojarasca (Reeder y Jurgensen, 1979; McGuie y Posner, 1981) o la actividad de las raíces (Dekker y Ritsema, 1996b; Doerr et al., 1998) parecen ser algunas de las causas principales. La composición de hojas y otros tejidos de árboles como *Quercus suber*, por ejemplo, incluye un elevado número de compuestos fenólicos de carácter hidrófobo (Conde et al., 1998; Ito et al., 2002; Salminen et al., 2004). Los extractos foliares de *Pinus pinaster* contienen sustancias capaces de inducir hidrofobicidad (Doerr, 1998). En un estudio reciente, Jordán et al. (2008) encontraron bajos niveles de

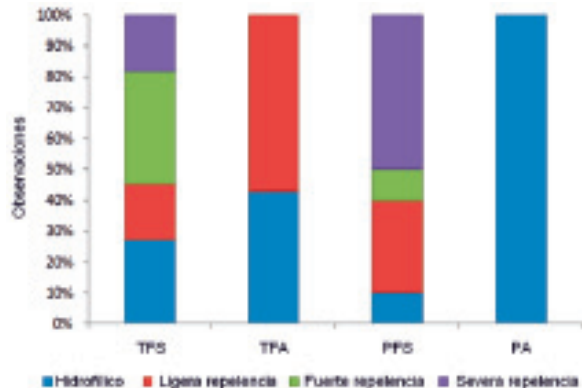


Figura 5. Distribución de clases de repelencia al agua en muestras de suelo bajo bosques mixtos densos de pino, abeto y encino sobre materiales ígneos del volcán Tancitaro (TFS, n=11), bosques mixtos dispersos de pino, abeto, encino y matorral sobre materiales ígneos del volcán Tancitaro (TFA, n=7), bosques de pino y encino sobre lavas del volcán Parícutín (PFS, n=10) y suelos desnudos sobre cenizas del volcán Parícutín (PA, n=9); Jordán et al., 2009).

repelencia al agua en suelos bajo bosques mixtos de *Quercus suber* y *Olea europea*, en comparación a otros tipos de vegetación presentes sobre el mismo sustrato y bajo el mismo tipo de clima, lo que les llevó a atribuir estas diferencias a la naturaleza química de los compuestos orgánicos liberados. Pardini et al. (2004) mostraron que especies de brezo como *Erica arborea* facilitan la incorporación de compuestos húmicos en el perfil del suelo involucrados en el desarrollo de complejos órgano-minerales. Carballeira (1980) y Ammar et al. (2004), a su vez, identificaron algunos compuestos fenólicos en los tejidos de *Erica australis* y en los suelos asociados a ella que pueden inducir repelencia al agua.

Los suelos bajo vegetación herbácea también pueden resistir la infiltración, un problema que ha sido considerado en áreas no agrícolas, pero de gran valor económico, como los campos de golf. La repelencia al agua bajo pastizales ha sido observada y descrita en dehesas en España y Portugal (Cerdà et al., 1998; Doerr et al., 2003; Keizer et al., 2005), en Australia (Crockford et al., 1991). Canadá (Barret y Slaymaker, 1989) y Holanda (Dekker y Ritsema, 1994). Además, se ha comprobado que especies herbáceas características de sistemas dunares (como *Spinifex hirsutus*) pueden inducir hidrofobicidad (McIntosh y Horne, 1994). La repelencia al agua también se encuentra asociado a algunos cultivos. Por ejemplo, en Australia, se desarrolla bajo cultivos de altramuz (*Lupinus cosentinii*; Carter et al., 1994).

### Hongos y microorganismos del suelo

Como se ha visto anteriormente, la relación de la repelencia al agua con ciertas plantas puede no ser directa. La repelencia al agua también se encuentra asociada con el crecimiento de hongos y microorganismos del suelo, los cuales pueden estar asociados con distintos tipos de vegetación. Schantz y Piemeisel (1917) postularon que la presencia de “anillos de hadas” se debía a los micelios de *Basidiomicea*, una especie común que contribuye a la descomposición de la hojarasca (Scheffer y Schachtschabel, 1989). El término “anillo de hadas” fue usado en un principio por los investigadores para describir la presencia de círculos desnudos concéntricos o zonas secas, en cuyo interior se veía estimulado el crecimiento de las plantas, usualmente pasto o cultivos. Estos anillos concéntricos fueron atribuidos a diversas fuentes naturales y sobrenaturales, como los caminos cerrados creados para el baile de las hadas, truenos, relámpagos, torbellinos, hormigas, topos, orina de animales, y así sucesivamente (DeBano, 2000a). En muchos casos, los fenómenos de anillos de hadas a nivel local eran tan abundantes que afectaban al rendimiento de los cultivos. Posteriormente, Bayliss (1911; citado por DeBano, 2000a) registró este fenómeno y citó medidas publicadas con anterioridad por Molliard (1910; citado por DeBano, 2000a) poniendo de manifiesto que un suelo rico en micelios de hongos tendía a permanecer relativamente seco. Según estos autores, el contenido en humedad del área ocupada con el micelio era sólo del 5-7%, en comparación con el 21% en las áreas internas y externas al anillo, no ocupadas por el micelio. Bayliss (1911) observó que los suelos que contienen micelios son difíciles de humedecer, citando ejemplos donde el agua no penetraba en el suelo en áreas infestadas de micelios, mientras que lo hacía hasta 10 cm en áreas adyacentes. En trabajos más recientes, se ha comprobado que en suelos donde *Marasmius oreades* ha formado anillos previamente, el suelo permanece repelente al agua, lo que no está relacionado con el contenido en materia orgánica del suelo, sino con la presencia del hongo (York y Canaway, 2000). Otras especies de

hongos y microorganismos asociados a la repelencia al agua, por ejemplo, son *Penicillium nigricans* y *Aspergillus sydowi* (Savage et al., 1972), además de otros organismos como los actinomicetos (Jex et al., 1985). Sin embargo, se han encontrado también resultados contradictorios, ya que algunas especies pueden inducir o inhibir hidrofobicidad bajo ciertas condiciones (McGuire y Posner, 1981; Roper, 1998). Bornemisza (1964) demostró que *Aspergillus niger* es capaz de inducir repelencia al agua, mientras que Savage et al. (1972) no observaron efectos importantes. Por otra parte, Roper (2006) demostró que la reducción de la repelencia al agua mediante la degradación de ceras por parte de microorganismos como *Mycobacterium* sp, o *Rhodococcus* sp, puede ser potenciada con el encalado.

Aunque la relación entre hongos e hidrofobicidad parece demostrada, autores como Fee-ney et al. (2006) han sugerido la necesidad de investigar el efecto causado en los suelos por especies concretas. También algunas especies de algas o bacterias pueden producir compuestos hidrofóbicos, y aunque su papel en el establecimiento de la repelencia al agua en los suelos puede ser significativo, ésto no está demostrado para taxones concretos y no existen estudios concluyentes al respecto (York y Baldwin, 1992).

### Materia orgánica y humus

Aparte de las investigaciones de la influencia directa de la vegetación y microorganismos en la repelencia al agua, los investigadores también han procurado establecer relaciones generales entre la materia orgánica en los suelos y/o contenido de carbono orgánico y el grado de repelencia (Doerr et al., 2000). Los resultados, sin embargo, no han sido concluyentes. Se han encontrado correlaciones positivas entre el contenido en materia orgánica del suelo y la persistencia de la repelencia al agua por Scholl (1975) en un suelo pedregoso bajo *Juniperus* sp. en Utah (EEUU), Singer y Ugolini (1976) en suelos subalpinos en el Estado de Washington (EEUU), Rodríguez-Alleres et al. (2007) en una región húmeda española, y Martínez-Zavala y Jordán-López (2009) en brezales subhúmedos mediterráneos. Pero también se han observado correlaciones pobres, negativas o no significativas (DeBano, 1981; Jungerius y de Jong, 1989; Wallis et al., 1990; Ritsema y Dekker, 1994; Scott, 2000), e incluso resultados contradictorios en función del tipo de vegetación o el uso (Martínez-Zavala y Jordán-López, 2009; Jordán et al., 2009), tal como se muestra en la figura 6. Como una posible explicación, muchos autores han concluido que la repelencia al suelo puede estar controlada por el tipo y calidad de la materia orgánica más que por su cantidad (DeBano et al., 1970; Wallis y Horne, 1992; Jaramillo, 2004). De acuerdo con DeBano (1971), Doerr et al. (1998) y Roy y McGill (2000), los ácidos húmicos pueden inducir hidrofobicidad en los suelos. Según Doerr et al. (2000), la única explicación para la falta de relación clara entre materia orgánica y repelencia al agua del suelo puede ser que la pequeña cantidad de compuestos hidrofóbicos responsable de la repelencia al agua no sea proporcional a la cantidad total de materia orgánica presente en los suelos, particularmente en los distintos horizontes o incluso en los distintos suelos comparados. Capriel et al. (1995) observaron que el contenido en arena de suelos cultivados en Alemania se correlacionaba positivamente con la proporción de cadenas de carbono alifáticas y negativamente con el contenido de carbohidratos y proteínas, lo que sugiere que los suelos arenosos poseen relativamente más uniones alquilo que los arcillosos, y, por lo tanto, que la materia orgánica en los primeros posee un carácter más hidrófobo.

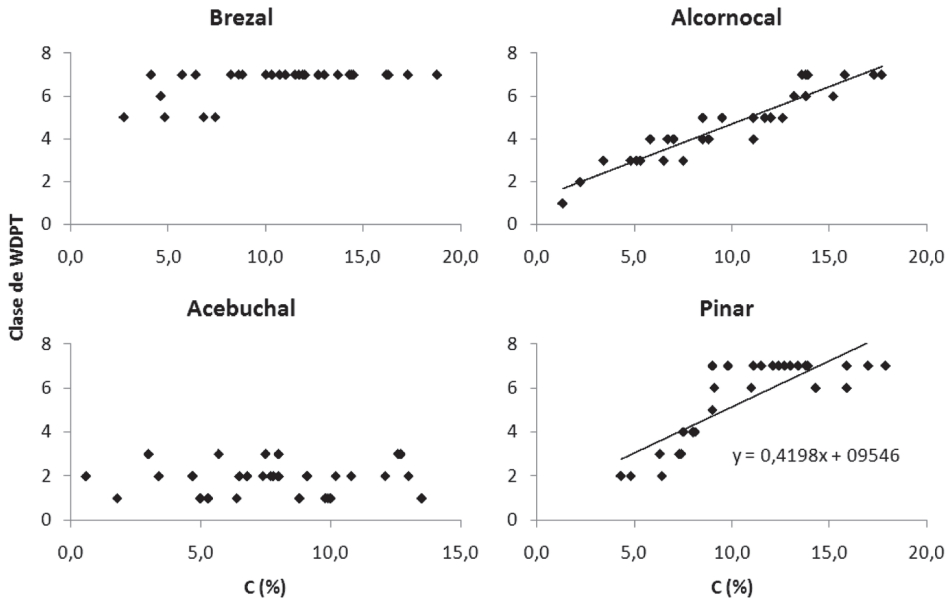


Figura 6. Relación entre la repelencia al agua (clase de WDPT) y el contenido en carbono orgánico del suelo bajo diferentes tipos de vegetación en la estación seca en el Parque Natural Los Alcornocales (Cádiz). La repelencia al agua aumenta con el contenido en carbono orgánico bajo bosques de alcornoque y pino, pero se mantiene en valores altos bajo brezal y bajos bajo acebuchal independientemente del contenido en carbono orgánico; a partir de Zavala et al. (2009).

## FACTORES ABIÓTICOS Y REPELENCIA

### Clima

La variación térmica produce un patrón estacional de repelencia al agua en el suelo, que se incrementa en la estación seca y disminuye en la estación húmeda. Según Dekker y Ritsema (2000), el grado de repelencia al agua del suelo aumenta cuando se secan en laboratorio. Por lo tanto, éste es un efecto indirecto de la temperatura, que afecta al grado de humedad del suelo. Los suelos repelentes al agua muestran un contenido de humedad crítico por debajo del cual muestran esta propiedad, tal como observaron Dekker y Ritsema (1994; 1995) en suelos arenosos del norte de Europa, Doerr y Thomas (2000) en suelos de Portugal, y diversos autores más en otras áreas. Debido a la irregularidad del clima mediterráneo, el patrón de incremento y disminución de la repelencia al agua en el suelo es especialmente importante en nuestra área. El efecto de las primeras lluvias de la estación húmeda sobre un suelo con baja cobertura vegetal, baja estabilidad de agregados y elevada repelencia al agua, como ocurre al final del verano, puede producir tasas de escorrentía y pérdida de suelo muy elevadas.

### Textura del suelo

Durante mucho tiempo se ha sostenido que la repelencia al agua del suelo estaba asociada a las fracciones texturales gruesas del suelo, tal como se demostró en el caso de suelos arenosos

(Roberts y Carbon, 1971; McGuie y Posner, 1980. DeBano, 1991). Dada una determinada cantidad de sustancias hidrofóbicas capaces de recubrir las partículas del suelo, las partículas más gruesas serían más susceptibles de desarrollar repelencia al agua dada su menor superficie específica (Giovannini y Luchesi, 1983; Blackwell, 1993). Crockford et al., (1991) encontraron que la repelencia al agua se veía incrementada con el tamaño de partícula en suelos bajo eucalipto. Por otro lado. DeBano (1991) concluyó que la repelencia al agua es más proclive a darse en suelos con menos de un 10% de contenido en arcillas. En la actualidad está bien establecido que la adición de arcillas pueden ser muy efectiva en la reducción a la repelencia al agua en suelos arenosos (Ma'shum et al., 1988; Cann y Lewis, 1994; Carter y Hetherington, 1994; Harper y Gilkes, 1994; McKissock et al., 2000; Dlapa et al., 2004). Además de incrementar la relación superficie/volumen del suelo, la arcilla contribuye a eliminar la repelencia recubriendo las superficies hidrofóbicas en la matriz del suelo, exponiendo una superficie hidrofílica (Ward y Oades, 1993). Sin embargo, la reducción de la repelencia por medio de la adición de caolinitas requiere al menos 100 Mg ha<sup>-1</sup> de este material (Blackwell, 1993), lo que plantea un problema económico si fuese necesario su transporte. No obstante, se ha observado que incluso en suelos con 25-40% de arcillas muestran extrema repelencia al agua (Crockford et al., 1991; Chan, 1992; Dekker y Ritsema, 1996b). Se ha sugerido que la formación de agregados facilitada por la presencia de arcillas reduce la superficie que es necesario recubrir con sustancias hidrofóbicas para producir repelencia al agua (Wallis et al., 1991; Bisdorf et al., 1993). Puede ocurrir también que el tamaño de las partículas de materia orgánica hidrofóbica sea suficientemente pequeño para intensificar el grado de repelencia en las fracciones finas frente a las gruesas (de Jonge et al., 1999).

Algunos autores se han preguntado si es más importante la superficie específica "per se" o el tamaño de la arena o los agregados (Harper et al., 2000), ya que la interacción entre los compuestos hidrofóbicos y el suelo puede ocurrir entre partículas orgánicas y agregados, partículas de arena, limo o arcilla, más que con cristales aislados (Franco et al., 1995). Por ejemplo, la superficie expuesta en espacios vacíos del orden de 0,1 nm entre capas de silicato de esmectitas e illitas podría no participar en la repelencia al agua, ya que los compuestos orgánicos hidrofóbicos no pueden introducirse en ellos. Esta posibilidad podría explicar el hecho de que la efectividad de la arcilla como enmendante de la repelencia al agua no es mayor si se usan arcillas de diferente tamaño o área expuesta (McKissock et al., 2000; Harper et al., 2000). En otros casos, se ha demostrado que una determinada cantidad de materia orgánica en el suelo puede ser suficiente para recubrir las partículas finas, además de las partículas minerales gruesas y los agregados (Doerr et al., 1996). Si esto ocurre, un suelo de textura fina podría también mostrar un grado elevado de repelencia al agua. Trabajos realizados por diversos autores (Crockford et al., 1991; Chan, 1992; Doerr et al., 1996) confirman este hecho, ya que han observado niveles de repelencia al agua en suelos de textura fina tan elevados como en otros tipos de suelo.

## Mineralogía

Aparte del efecto que la textura del suelo puede tener sobre la presencia o no de la repelencia al agua, la mineralogía de la arcilla también posee una influencia importante, tal como han observado diversos autores (McKissock et al., 2000; Dlapa et al., 2004; Mataix-Solera et al., 2008). Mientras que en la mayoría de estudios se ha observado que un incendio de baja intensidad puede



inducir repelencia al agua en suelos que previamente no la mostraban, en algunos casos no se han encontrado diferencias significativas en el grado de repelencia al agua antes y después del fuego. Así se ha observado en suelos de textura franco arcillosa en California (Busse et al., 2005), en suelos arcillosos de Italia (Giovannini y Lucchesi, 1983) o en suelos rojos calcáreos mediterráneos (terra rossa) del sureste de la Península Ibérica y del norte de Israel (Mataix-Solera et al., 2008).

Tras un experimento de laboratorio, Arcenégui et al. (2007) observaron que, tras someter diferentes muestras de un Luvisol crómico a calentamiento intenso, no lograban desarrollar repelencia al agua, lo que sí ocurría con otros tipos de suelo. Además, se ha observado que determinados tipos de suelos de textura arcillosa con suficiente materia orgánica como para desarrollar repelencia al agua tras la acción del fuego, tal como sugirió DeBano (1991), no lo hacen (Mataix-Solera et al., 2008). Esto puede deberse a la cantidad relativamente baja de materia orgánica frente al contenido de arcilla, tal como ha sugerido diversos autores (DeBano, 1981; Giovannini y Lucchesi, 1983), aunque otros apuntan al origen mineralógico de las arcillas como la causa principal (Lichner et al., 2006, Mataix-Solera et al., 2008).

Después de un experimento de laboratorio, Lichner et al. (2006) demostraron que illita, montmorillonita y caolinita poseen efectos diferentes sobre la repelencia al agua del suelo. Solamente la caolinita se mostró efectiva a la hora de reducir la persistencia de la repelencia al agua de arena de sílice recubierta con ácido esteárico. Mataix-Solera et al. (2008) observaron que la presencia de minerales como la caolinita, dominante en la composición de las arcillas en diferentes suelos del área mediterránea, no favorece el desarrollo de repelencia al agua tras el fuego. Según estos autores, el carácter hidrofílico de la Ca-montmorillonita puede deberse a la presencia de cationes hidratados, aunque la sustitución de estos cationes por moléculas orgánicas mediante diversos tipos de unión puede hacerla hidrofóbica (Jaynes y Boyd, 1991). Esta afirmación está de acuerdo con los resultados obtenidos por Jouany (1991), quien observó que cantidades muy pequeñas de ácidos húmicos adsorbidos a la superficie de Ca-montmorillonita podían inducir carácter hidrofóbico al mineral.

La caolinita, sin embargo, posee una capa hidrofóbica con grupos siloxano ( $R_2SiO$ , donde R es un átomo de hidrógeno o un grupo hidrocarbonado) y una capa hidrofílica con grupos hidroxilo asociados a la capa de octaedros. La importancia de estos grupos hidroxilos en la hidrofilia de la caolinita ha sido puesta de manifiesto por Bachmann y van der Ploeg (2002) y Dlapa et al. (2004). Si la capa octaédrica es de naturaleza hidrofílica, la adsorción de moléculas orgánicas hidrofóbicas podría estar limitada debido a la adsorción preferente de agua, de modo que la caolinita podría ser más importante en la preservación del carácter hidrofílico del suelo que la montmorillonita o la illita, y más efectiva como agente mejorante de suelos hidrofóbicos (Mataix-Solera et al., 2008).

## El manejo agrícola

En comparación con las áreas naturales o semi-naturales, la repelencia al agua en un fenómeno muy poco estudiado en los suelos cultivados, especialmente en las zonas mediterráneas (Keizer et al., 2007) aunque precisamente, los primeros trabajos sobre la repelencia al agua en los suelos se centraron en los suelos agrícolas (Jamison, 1943, 1946, Wander, 1949).



En la actualidad, existe una fuerte necesidad de caracterizar la repelencia al agua en los suelos agrícolas a escala regional sobre una variedad de suelos, tipos de manejo y clima, pero especialmente en el caso del no laboreo, tal como afirman Blanco-Canqui y Lal (2009). Según estos autores, la repelencia al agua varía con el tipo de suelo y las prácticas agrícolas, de modo que puede tener diferentes impactos sobre la estabilidad de los agregados o el secuestro de carbono.

En el caso de las zonas de clima mediterráneo, la repelencia al agua se intensifica durante la época seca y disminuye o desaparece durante la época húmeda. Sin embargo, si las lluvias son escasas durante un año en concreto, el suelo puede alcanzar un estado de repelencia severa al agua, como observaron Keizer et al. (2007). La repetición de los ciclos de humedecimiento y secado como consecuencia del riego puede favorecer la presencia de microorganismos capaces de inducir repelencia al agua en los suelos agrícolas (Zhang et al., 2004). En un trabajo reciente, Keizer et al. (2007) analizaron la repelencia al agua en suelos agrícolas del norte y centro de Portugal y observaron que las variaciones de intensidad de la repelencia no mostraban una clara correlación con la humedad del suelo, y manifestaron la necesidad de investigar qué factores se hallan directamente implicados en la aparición y control de la hidrofobicidad en los suelos agrícolas.

Además de este desconocimiento, se ha sugerido que determinados tipos de manejo pueden inducir repelencia al agua en el suelo. Según Cerdà y Doerr (2007), la repelencia al agua en suelos cultivados es poco común en suelos calcáreos. Sin embargo, estos autores sugirieron que determinadas prácticas como la fertilización orgánica pueden inducir repelencia al agua en los suelos dedicados al cultivo de cítricos en el área mediterránea. Por otra parte, Wallach y Jortzick (2008) y Wallach et al. (2005) observaron que el empleo de aguas residuales tratadas para el riego de frutales en Israel durante un período de 20 años indujo repelencia al agua en el suelo.

### **Efectos del fuego sobre la repelencia al agua del suelo**

El fuego puede provocar cambios inmediatos en determinadas propiedades del suelo como consecuencia del calentamiento producido en los primeros centímetros superficiales, y cambios indirectos debido a la nueva situación en la que se encuentra, como la eliminación temporal de toda o parte de la cubierta vegetal o la cubierta de cenizas incorporada al suelo (Mataix-Solera y Guerrero, 2007; Mataix-Solera et al., 2009). Diversas investigaciones en el área mediterránea han descrito el efecto de los incendios sobre las propiedades físicas y químicas del suelo (ver, por ejemplo, Mataix-Solera et al., 2009).

La cuantificación directa de los efectos de los incendios sobre el suelo en condiciones de campo es muy difícil de llevar a cabo, ya que en la mayoría de los casos no se posee una información precisa de las propiedades del suelo antes del incendio. Sin embargo, en los casos en que se han realizado estudios comparativos entre zonas quemadas y no quemadas, o bien la repelencia al agua era mayor en las primeras, o bien había sido destruída pero se había formado una capa hidrófoba en profundidad (McNabb et al., 1989; Brock y DeBano, 1990; Scott y Van Wyk, 1990).

Varios autores (DeBano, 1966; DeBano y Krammes, 1966; DeBano et al., 1970; Savage, 1974) han observado que el fuego puede inducir repelencia al agua sobre suelos que previamente no

la presentaban. Robichaud y Hungerford (2000) observaron que al someter a diferentes tipos de suelo a calentamiento en laboratorio se generan gradientes de temperatura que provocan la redistribución de las sustancias hidrofóbicas en el suelo. Además, observaron interacciones entre la temperatura, el contenido de agua y otras propiedades del suelo. Factores como la temperatura alcanzada, la cantidad y tipo de hojarasca consumida y la humedad del suelo antes de producirse el incendio, pueden intensificar o reducir la repelencia al agua en los suelos. Según estos autores, las sustancias orgánicas hidrofóbicas en la hojarasca y en la superficie del suelo se volatilizan durante el incendio. Una pequeña parte de esta cantidad de material es desplazada en profundidad, siguiendo el gradiente térmico hasta condensarse de nuevo a pocos centímetros bajo la superficie. DeBano (1991) sugirió que el calentamiento de suelos no repelentes al agua que contuviesen más del 2-3% de materia orgánica siempre induciría repelencia al agua.

Las temperaturas que se alcanzan en el suelo durante el fuego, son muy variadas dependiendo de los factores implicados. En general, y puesto que el suelo es un mal conductor del calor, las temperaturas que se alcanzan en capas profundas del suelo son bajas, a pesar de que las llamas sobrepasen en ocasiones los 1400 °C (DeBano et al., 1998). Numerosos trabajos muestran que durante un incendio se alcanzan fácilmente temperaturas entre 500 y 800 °C en superficie. En profundidad, sin embargo, la variabilidad de registros es muy amplia; desde una variación irrelevante a 5 cm de profundidad a máximos de 100-300 °C. Después de estudiar los efectos de la temperatura durante un experimento de laboratorio. DeBano y Krammes (1966) encontraron que temperaturas entre 480 y 540 °C durante períodos de 25 minutos pueden destruir la repelencia en la superficie del suelo, mientras que temperaturas alrededor de 200 °C durante 10 minutos pueden intensificarla. A partir de experimentos de laboratorio, varios autores han observado que temperaturas entre 250 y 350 °C son suficientes para destruir la repelencia al agua del suelo (DeBano et al., 1979; Robichaud y Hungerford, 2000; García-Corona et al., 2004; Mataix-Solera y Guerrero, 2007). Por encima de ese intervalo de temperatura, la repelencia al agua tiende a disminuir, aunque no se producen cambios radicales. DeBano y Krammes (1966) observaron que tras 5 minutos a 600 °C, el suelo mostraba una repelencia extrema. Sin embargo, las sustancias hidrofóbicas desaparecen a temperaturas más altas: a 800 °C, la repelencia al agua comienza a disminuir después de sólo 10 minutos, y se destruye completamente después de 20 minutos, mientras que a 900 °C el suelo se vuelve completamente hidrofílico después de sólo 10 minutos (DeBano y Krammes, 1966).

Algunos autores han sugerido que la repelencia al agua inducida por el fuego es el resultado de reacciones químicas que tienen lugar durante el proceso, que intensifica las uniones entre estas sustancias y las partículas del suelo (Savage, et al., 1972) y las hace aún más hidrofóbicas a causa de la pirólisis (Giovannini, 1994), más que los mecanismos de volatilización-condensación. Además, factores como la acumulación de cenizas, la volatilización de los compuestos orgánicos durante la combustión y su posterior condensación alrededor de los agregados del suelo, pueden inducir o incrementar la hidrofobicidad. Cerdà y Doerr (2008), por ejemplo, observaron que tras un incendio forestal en un suelo bajo pinar, la repelencia al agua del suelo se redujo significativamente en el área cubierta por cenizas y restos de hojarasca quemada.

Al discutir los efectos del fuego sobre el suelo es importante diferenciar entre intensidad y severidad del fuego. Ambos términos se usan frecuentemente, a pesar de que no tienen significados

completamente iguales (Hartford y Frandsen 1992). DeBano y Neary (2005) describen el término “intensidad del fuego” como la tasa o la velocidad a la que el fuego libera energía térmica, apoyándose en los criterios de Brown y Davies (1973) y Chandler et al. (1991). La severidad del fuego, sin embargo, es una medida cualitativa, que se usa para describir algunas respuestas del ecosistema al fuego (Simard, 1991). La severidad del fuego puede clasificarse de acuerdo con ciertos criterios como la cantidad de combustibles consumidos, las propiedades de estos combustibles (altura, diámetro de las ramas o troncos, contenido de agua y contenido mineral), el efecto de estos combustibles en el fuego durante las distintas fases del incendio o la transferencia de calor y sus efectos posteriores (color de las cenizas, cambios texturales y pérdida de materia orgánica). Una revisión muy interesante de estos dos conceptos fue realizada por Keeley (2009).

## PRINCIPALES CONSECUENCIAS DE LA REPELENCIA AL AGUA DEL SUELO

### Escorrentía e infiltración

Como ya se ha dicho, la repelencia al agua reduce la afinidad de los suelos por el agua, así como su resistencia a la humectación durante intervalos de tiempo que pueden oscilar entre períodos de unos pocos segundos hasta horas, días o semanas. La repelencia al agua de los suelos es un factor importante que afecta a los procesos de escorrentía e infiltración y es, potencialmente, un componente clave en los modelos hidrológicos (Doerr et al., 2003; Doerr y Shakesby, 2009).

La superficie de un suelo repelente al agua facilita el encharcamiento del agua de lluvia en lugar de la infiltración. Si la cantidad de lluvia es suficiente, se genera un exceso de agua encharcada que inicia un flujo superficial hortoniano. Las discontinuidades de la superficie, como agujeros o grietas, así como el mosaico de hifrofobicidad/hidrofilia del suelo determinarán si el flujo se produce de manera amplia o localizada. Estudios previos, realizados en suelos hidrofílicos han concluido que el flujo superficial por exceso de infiltración (flujo hortoniano) rara vez ocurre en suelos forestales (Tsukamoto, 1961; Dunne y Black, 1970), ya que estos suelos suelen tener suficiente capacidad de infiltración para soportar altas intensidades de lluvia de duración normal. Se ha llegado a sugerir que la formación de arroyadas en cuencas forestales con suelos hidrofílicos es debida fundamentalmente al flujo subsuperficial (Rice y Hornburger, 1998; McGlynn et al., 2002; Doerr et al., 2003; Doerr y Shakesby, 2009). Según estos autores, el agua encharcada sobre una superficie hidrófoba puede almacenarse en un lecho hidrofílico hasta su evaporación o desplazarse lateralmente a través de él, perderse como escorrentía superficial, infiltrarse mediante vías de flujo preferencial, o penetrar en la matriz hidrófoba si la presión de la columna de agua es suficiente. Sin embargo, estudios recientes han observado que en suelos forestales repelentes al agua, el proceso dominante es la escorrentía superficial (Bonell y Williams, 1986; Prosser y Williams, 1998; Doerr et al., 2003).

El proceso de encharcamiento e infiltración en suelos hidrofílicos y repelentes al agua fue estudiado detalladamente por Wallach y Jortzick (2008). Observaron que mientras que el agua penetraba rápidamente en el suelo hidrofílico, en el suelo repelente tendía a extenderse sobre la superficie, formando un ángulo de contacto mayor de 90°. En este caso, el agua encharcada penetraba muy lentamente en el suelo manteniendo el ángulo de contacto. Encontraron que el tiempo de pene-

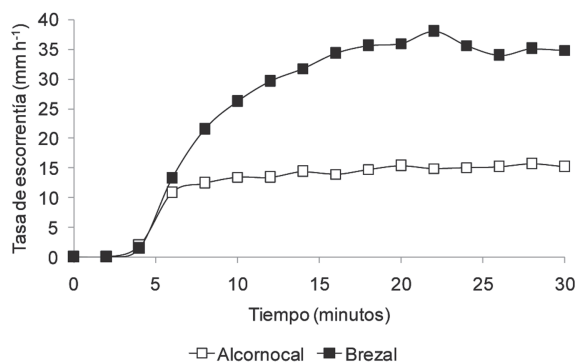


Figura 7. Producción de escorrentía bajo diferentes tipos de vegetación, condicionada por la repelencia al agua del suelo, mayor en suelos bajo brezal que bajo alcornocal (modificado a partir de Jordán et al., 2008).

tración del agua en suelos de carácter hidrófobo podría estar controlado por el tiempo de contacto entre las partículas del suelo y el agua, así como por la presión ejercida por la columna de agua sobre la superficie del suelo.

Jordán et al. (2009) analizaron la relación entre la repelencia al agua y la pérdida de suelo mediante simulación de lluvia en áreas del Eje Neovolcánico de México, y observaron que la respuesta hidrológica está relacionada con el grado de repelencia al agua de los suelos estudiados.

Aunque no se encontró una correla-

ción significativa entre la persistencia de la repelencia y la tasa de escorrentía, sí se observó que el flujo superficial era más intenso en suelos repelentes al agua que en suelos hidrofílicos.

En un experimento de laboratorio, tras destruir la repelencia al agua de un suelo mediante un tratamiento térmico. DeBano (1971) observó que la capacidad de infiltración de un suelo se incrementó hasta 25 veces. Wallis et al. (1990) observaron que la capacidad de infiltración de suelos repelentes al agua era hasta 6 veces mayor que la de suelos adyacentes no repelentes al agua.

Jordán et al. (2008) analizaron la respuesta hidrológica de suelos repelentes y no repelentes al agua en un área mediterránea y encontraron que el tiempo de generación de escorrentía era menor y que la tasa de escorrentía se incrementaba cuando aumentaba el grado de repelencia al agua (Figura 7). La relación de la hidrofobicidad con otras propiedades del suelo como la acidez, la textura o el contenido en materia orgánica, y las discontinuidades de cada una de ellas, contribuyen a una distribución espacial heterogénea de la respuesta erosiva del suelo (Jordán et al., 2008).

La tendencia de los suelos secos a mostrar un alto grado de repelencia (Witter et al., 1991; Ritsema y Dekker, 1994) implica que, en el caso de suelos repelentes al agua, el coeficiente de escorrentía tiende a incrementarse cuando la humedad del suelo desciente. Por otra parte, es necesario tener en cuenta que la repelencia al agua depende en gran medida de las lluvias precedentes (Crockford et al., 1991; Keizer et al., 2005; Miyata et al., 2007), lo que puede afectar al coeficiente de escorrentía. Aunque diversos autores han mostrado una fuerte relación entre el impacto de la repelencia al agua y la generación de escorrentía (Osborn et al., 1964; Cerdà et al. 1998; Benito et al., 2003; Leighton-Boyce et al., 2007), el papel exacto de la repelencia al agua es difícil de determinar, ya que es difícil aislarlo de otros factores como las propiedades físicas o el contenido en humedad del suelo (Miyata et al., 2007).

## Pérdida de suelo

Aunque las tasas de erosión en suelos repelentes al agua tienden a ser pequeñas bajo una densa cobertura vegetal (Cerdà y Doerr, 2007), sí pueden ser muy altas en áreas donde la vegetación natural ha disminuido como consecuencia de la presión antrópica mediante la tala, aclarado,

sobrepastoreo, construcciones o por incendios forestales, como han puesto de manifiesto diversos autores (Scott, 1993; Shakesby et al., 1993; Úbeda y Sala, 1998; Ferreira et al., 2000; Cerdà y Doerr, 2007; Jordán et al., 2009). Especialmente, al inicio de la estación de lluvias en climas con irregularidad estacional como el mediterráneo, cuando la humedad del suelo es muy baja y el grado de hidrofobicidad es muy alto (Osborn et al., 1964; Cerdà et al., 1998; Doerr et al., 2003; Jordán et al., 2008), el riesgo de erosión del suelo se ve incrementado.

En suelos arenosos de la costa holandesa, Witter et al. (1991) demostraron que la pérdida de sedimentos por el agua de escorrentía se incrementaba casi 20 veces en suelos repelentes al agua frente a suelos más hidrofílicos, aunque la relación entre ambos parámetros no pudo ser aislada de otros factores, como la humedad del suelo o el contenido en materia orgánica.

Mediante experimentos de simulación de lluvia, Jordán et al. (2009) determinaron una buena correlación entre la tasa de escorrentía y la pérdida de suelo. Encontraron que, como promedio, la pérdida de suelo se incrementaba en más del 40% en los suelos repelentes al agua que en los hidrofílicos. Sin embargo, se ha observado que la distribución espacial de áreas repelentes e hidrófilas constituía un mosaico o patrón discontinuo que se mostraba efectivo a la hora de “recoger” e infiltrar el agua procedente de zonas hidrófobas (Jordán et al., 2008; Jordán et al., 2009). Estudios a una escala de cuenca son necesarios para confirmar y precisar estos datos.

El papel de la repelencia al agua en la erosión del suelo es especialmente alto en el caso de suelos afectados por incendios de alta intensidad, en los que la infiltración puede verse drásticamente reducida (Campbell et al., 1977; Rulli y Rosso, 2007), incluso en suelos con abundantes macroporos (Imeson et al., 1992). En el caso de fuegos de baja intensidad, el impacto es menor, y el tiempo de recuperación de las propiedades previas al fuego tiene más que ver con la recuperación natural de la vegetación (Hudson et al., 1983). Se han observado aumentos en la tasa de escorrentía tras el fuego en suelos y cuencas de diferentes características (Anderson et al., 1976; Campbell et al., 1977; Nasserí, 1988; Inbar et al., 1988; Cerdà, 1998). En el caso de los suelos mediterráneos, la recuperación de la vegetación y la regeneración de la capa de hojarasca, así como de las características del suelo previas al fuego, puede ser bastante rápida (Fuentes et al., 1994; Cerdà, 1998), lo que demuestra la adaptación de estos ecosistemas a los fuegos naturales (Naveh y Lieberman, 1984).

### Estabilidad de agregados

Un parámetro fuertemente relacionado con la erosión del suelo es la estabilidad de los agregados. El grado de estabilidad de los agregados es uno de los factores que más fuertemente influyen sobre la erosionabilidad. Además condiciona la infiltración, y por tanto afecta a la tasa de escorrentía y la erosión. La estabilidad estructural se convierte tras los incendios, debido a la eliminación de la cubierta vegetal y la hojarasca, en una característica clave en la gestión del agua y la pérdida de nutrientes y materiales del suelo (Mataix-Solera et al., 2009). En un principio, la combustión de la materia orgánica en incendios de alta intensidad llevaría a la destrucción de agregados, teniendo en cuenta el importante papel de ésta en la agregación (Oades, 1993).

Sin embargo en muchos casos, se ha observado lo contrario, es decir valores de estabilidad superior en los suelos quemados comparando con los valores de los suelos controles de referencia, lo que puede deberse a distintas causas, como el tipo de incendio, cambios en la

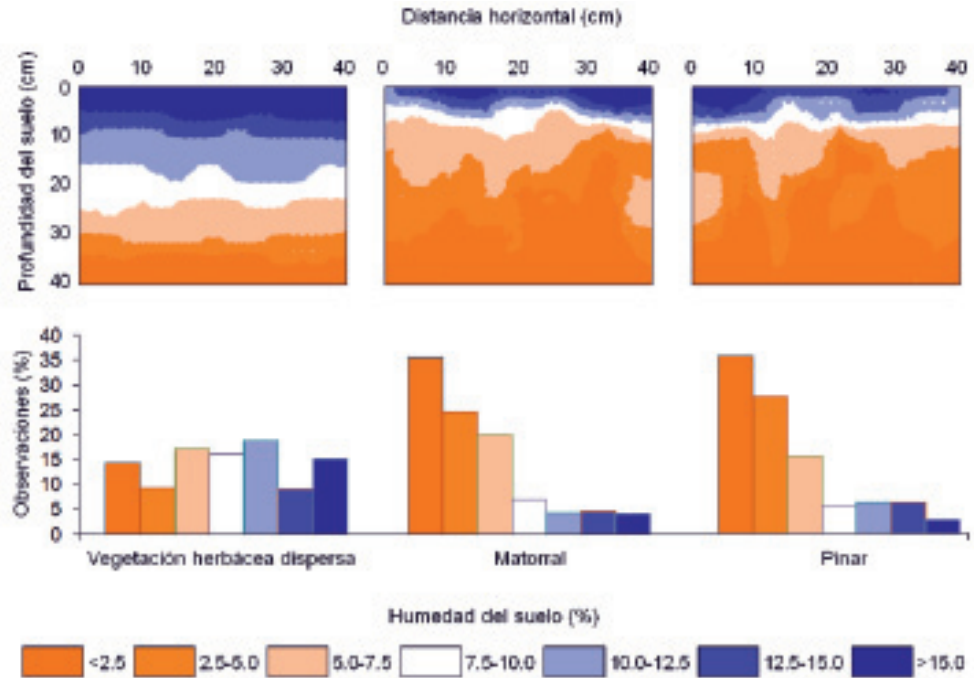


Figura 8. Isolneas de contenido volumétrico de agua en tres perfiles seleccionados bajo diferentes tipos de vegetación tras la simulación de lluvia. B: histograma de distribución de observaciones según su contenido volumétrico de agua bajo vegetación herbácea dispersa, matorral y pinar (n = 2205 en cada caso).

mineralogía de la fracción arcilla, destrucción de agregados por la combustión de la materia orgánica, y selección de los agregados más resistentes (Guerrero et al., 2001; Mataix-Solera y Doerr, 2004; Arcenegui et al., 2008). Otra posible explicación es que la presencia de compuestos hidrofóbicos puede aumentar la estabilidad de agregados al impedir el humedecimiento y la pérdida de estabilidad como consecuencia de la humedad (Chenu et al., 2000; Hallett et al., 2001; Mataix-Solera y Doerr, 2004; Arcenegui et al., 2008).

### Flujo preferencial

Dekker y Ritsema (2000) demostraron que variaciones de la repelencia al agua a una escala de centímetros en la superficie del suelo pueden causar la aparición de vías de infiltración o flujo preferencial en el perfil del suelo. Este hecho es particularmente interesante, dado que de este modo el volumen de suelo entre estas vías de flujo puede permanecer virtualmente seco incluso durante periodos de lluvia intensa o toda una estación húmeda, con fuertes implicaciones tanto hidrológicas o geomorfológicas como nutricionales.

El flujo preferencial consiste en el movimiento vertical del agua a través de "caminos" hidrófilos a través de una matriz hidrófoba. Estos caminos pueden originarse como consecuencia de

grietas, macroporos, galerías excavadas, relleno de huecos de antiguas raíces, discontinuidades texturales y otras causas (Ritsemá et al., 1993). Bauters et al. (1998) describieron la presencia de vías de flujo preferencial en suelos con distinto grado de repelencia, mientras que los suelos no repelentes al agua muestran un frente de mojado uniforme y más o menos paralelo a la superficie. Cuando el encharcamiento de agua sobre una superficie hidrófoba alcanza un punto en que la presión de la columna de agua fuerza la infiltración, o el flujo lateral alcanza un punto de escasa hidrofobicidad, se produce la infiltración a través de estas vías de flujo preferencial, originándose un frente de mojado irregular. Como consecuencia, un suelo puede no mojarse completamente a pesar de la infiltración de una cantidad importante de agua, ya que ésta discurre canalizada por macroporos y grietas (DeBano, 1971; Burch et al., 1989), disminuyendo el riesgo de erosión (Walsh et al., 1995). Jordán et al. (2009) analizaron la forma del frente de mojado y la existencia de vías de flujo preferencial en suelos volcánicos de México, encontrando que los suelos con distintos grados de repelencia al agua mostraban frentes de mojado muy irregulares, con distinto grado de penetración en función de diversas variables, como la textura, la densidad aparente, la frecuencia de macroporos y la humedad. Sin embargo, los suelos con un grado de repelencia al agua bajo o nulo mostraron frentes de mojado homogéneos y con una velocidad de penetración uniforme (Figura 8).

## METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA REPELENCIA

Los distintos métodos utilizados en la actualidad para la determinación de la repelencia al agua del suelo se basan en procesos físicos diferentes. El test del tiempo de penetración de la gota de agua, por ejemplo, mide cuánto tiempo persiste una gota de agua sobre la superficie del suelo (Figura 9), lo que se encuentra relacionado con el tiempo requerido por una gota de agua de lluvia para su infiltración y con la tasa de generación de escorrentía (Doerr, 1998). Por otro lado, otros métodos miden la tensión superficial del líquido sobre el



Figura 9. Gotas de agua sobre la superficie de un suelo extremadamente repelente al agua, 1 hora después de ser depositadas. Fotografía: L.M. Zavala.

material del suelo, indicando la intensidad de la repelencia al agua en el suelo, mediante el método del porcentaje de etanol o método de la molaridad de una gota de etanol (Doerr, 1998; Letey et al., 2000; Roy y McGill, 2002). La determinación del ángulo de contacto en la interfase agua-suelo es el método de medida más directa de la intensidad de la repelencia al agua en suelos. Este factor llega a ser importante cuando se intentan encontrar diferencias estadísticamente significativas en la repelencia al agua de distintos suelos (Letey et al., 2000).



## Condiciones de campo y condiciones de laboratorio

La determinación de la repelencia al agua de los suelos en campo proporciona información *in situ* que permite relacionar los resultados con el contenido en humedad del suelo, la precipitación, la estación u otros procesos y factores ambientales. Si por el número de medidas necesarias es difícil la determinación en condiciones de campo, las muestras de suelo deben ser recogidas en bolsas de plástico y transportadas rápidamente al laboratorio para su tratamiento inmediato, minimizando así los efectos de los cambios de temperatura, la condensación o la redistribución de agua en las muestras.

El secado de las muestras en laboratorio permite la determinación de la repelencia al agua potencial del suelo. Sin embargo, algunos autores han demostrado que el secado de las muestras en laboratorio puede incrementar o disminuir el grado de hidrofobicidad, además de que no simula perfectamente las condiciones del suelo tras un proceso prolongado de sequía, por ejemplo, por lo que recomiendan la determinación de la repelencia al agua en condiciones de campo (Ritsema et al., 2008).

## Test del tiempo de penetración de la gota de agua

El test del tiempo de penetración de la gota de agua (*Water Drop Penetration Time*, WDPT) consiste en colocar una gota de agua sobre la superficie del suelo, registrando el tiempo que necesita el agua para penetrar en el suelo (Figura 10), de modo que se obtiene una medida del tiempo que persiste la hidrofobicidad sobre la superficie porosa (Wessel, 1988). De esa manera el WDPT relaciona la hidrofobicidad con las propiedades hidrológicas del suelo, ya que el tiempo requerido por la infiltración de las gotas de lluvia afecta de manera importante a la generación de escorrentía superficial. Si la repelencia al agua del suelo se mantuviese constante, independientemente de la duración del contacto entre la gota de agua y la superficie del suelo, la gota se infiltraría instantáneamente, en el caso de un suelo hidrofílico, o permanecería en la superficie hasta su evaporación, en el caso de un suelo repelente al agua (Tschapek, 1984). Sin embargo, una vez que se produce el contacto, el carácter hidrofóbico de la superficie del suelo disminuye, por lo que el test WDPT muestra el tiempo durante el cual la tensión superficial del suelo permanece más alta que la de la gota. Es decir, el tiempo que dura la hidrofobicidad (Doerr, 1998). De acuerdo con Letey et al. (2000), el WDPT es una medida del tiempo requerido por el ángulo de contacto para cambiar su valor inicial, mayor de 90°, hasta un valor aproximado a 90°, momento en el que en teoría tiene lugar la infiltración.

Siguiendo las recomendaciones de Doerr (1998), 15 gotas de agua destilada (a una temperatura de 20 °C) deben aplicarse sobre la superficie del suelo.

La medida puede realizarse sobre la superficie inalterada del suelo *in situ*, lo que permite llevar a cabo comparaciones bajo condiciones naturales variables. En este caso, es necesario retirar cuidadosamente los restos orgánicos y residuos que puedan interferir en la medida, dejando expuesta la superficie mineral del suelo.

Sin embargo, la necesidad de realizar estudios comparables estandarizados implica la determinación del WDPT sobre muestras de suelo secadas y tamizadas. En este caso, las muestras de suelo deben secarse (25 °C) hasta peso constante, lo que suele producirse tras 48 horas. Posteriormente se tamizan (< 2 mm), retirando las partículas gruesas y homogeneizando la fracción de tierra fina. Es conveniente que las muestras se mantengan bajo condiciones constantes de labo-



REPELENCIA AL AGUA EN SUELOS AFECTADOS POR INCENDIOS:  
MÉTODOS SENCILLOS DE DETERMINACIÓN E INTERPRETACIÓN

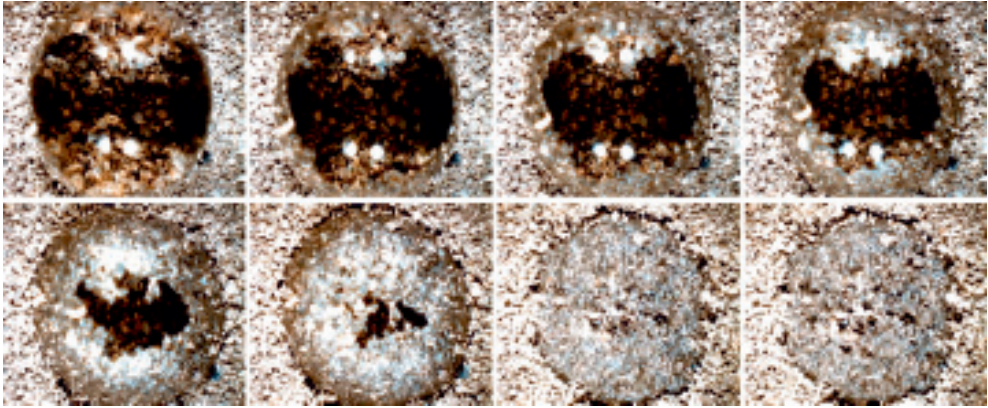


Figura 10. Proceso de infiltración de una gota de agua sobre la superficie de un suelo fuertemente repelente al agua (de izquierda a derecha y de arriba abajo). La infiltración completa (última imagen) se produjo a los 120 segundos. Foto: L.M. Zavala y A. Jordán.

ratorio (20 °C y humedad relativa del 50%) durante 7 días para eliminar los efectos potenciales de la variación de humedad atmosférica en la hidrofobicidad, de acuerdo con Doerr et al. (2002, 2005).

Posteriormente, se registrará el tiempo que necesita cada gota para su infiltración, y se tomará como representativo de cada suelo el promedio del tiempo requerido por el número de gotas depositadas. DeBano (1981) sugirió que el suelo podía ser considerado repelente al agua si la gota de agua no se infiltra en los primeros 5 segundos (ver también Adams et al., 1969; Roberts y Carbon, 1971). Cuando el tiempo de penetración es largo, las gotas de agua sufren evaporación y pueden empezar a deformarse, lo que ocasiona que el WDPT no pueda utilizarse de manera absoluta, sino que es necesario utilizar un sistema de clasificación. En la tabla 1 se muestran los sistemas de clasificación de la repelencia desarrollados por diversos autores.

Tabla 1. Clases WDPT utilizada por diferentes autores para clasificar la persistencia de la repelencia al agua en los suelos.

Clase	Adams et al., (1969)	Roberts y Carbon (1971)	McGhie y Posner (1981)	Ma'shum y Farmer (1985)	Bisdorn et al. (1993)	Doerr et al. (1996)	Doerr et al. (1998)	Dekker y Ritsema (1994)
Hidrofilico	<10	<1	<60	<1	<5	<60	<5	0-60
Ligeramente repelente al agua	10-60	1-10			5-60		5-10 10-30 30-60	60-180
Fuertemente repelente al agua		10-60			60-600		60-180 180-300 300-600	180-300
Severamente repelente al agua	>60	>60			600-3600	<3600	600-900 900-3600	
Extremadamente repelente al agua					>3600		3600-18000 >18000	

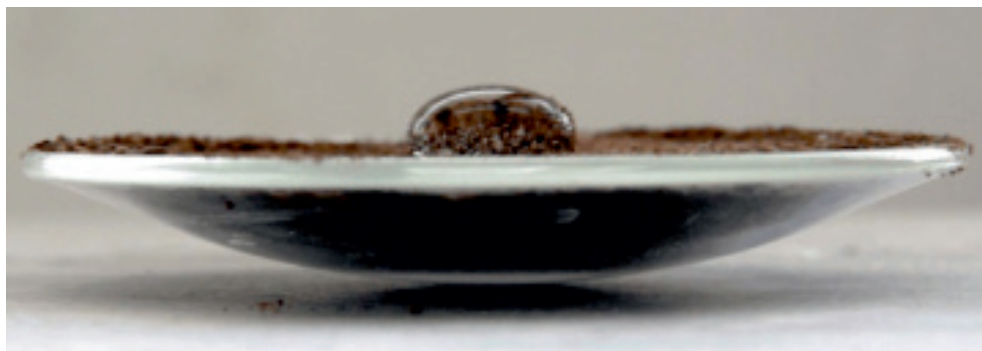


Figura 11. Detalle de la realización del test WDPT. Foto: A.J.P. Granged, A. Jordán y L.M. Zavala.

Para la determinación del WDTP, las muestras de suelo se dispondrán sobre un recipiente adecuado (vidrio de reloj o placa de Petri; ver figura 11). Se aplicarán 5-15 gotas de agua destilada (20 °C) mediante una jeringa hipodérmica o micropipeta sobre la superficie del suelo. El tamaño de la gota no debe ser superior a 0,05 mL, y debe dejarse caer desde una distancia no mayor de 15 mm para evitar un exceso de energía cinética que pueda afectar a la infiltración.

### Test del porcentaje de etanol

El test del porcentaje de etanol (TPE) se basa en la tensión superficial de una serie de disoluciones estandarizadas de etanol en agua. El TPE proporciona una medida indirecta de la tensión superficial del suelo y, por lo tanto, indica la intensidad de la repelencia al agua del suelo.

El procedimiento consiste en la aplicación de gotas (0,05 mL) de soluciones con distinta concentración de etanol se colocan sobre la superficie del suelo y se observa si se produce su infiltración durante unos segundos (Watson y Letey, 1970). Cada gota debe dejarse caer desde una distancia no mayor de 15 mm para evitar un exceso de energía cinética que pueda afectar a la infiltración.

Tal como en el caso del WDPT, las muestras de suelo se dispondrán sobre un recipiente adecuado (vidrio de reloj o placa de Petri), aplicando sucesivamente gotas de agua (20 °C) con concentraciones de etanol creciente mediante una jeringa hipodérmica o micropipeta sobre la superficie del suelo. Los resultados pueden verse afectados por la temperatura y el contenido inicial de agua del suelo, de modo que es recomendable que las determinaciones en laboratorio se realicen con suelo seco para obtener medidas estandarizadas. La tabla 2 muestra las clases de concentración de etanol recomendadas (Doerr et al., 2002). El incremento entre una clase y otra corresponde a un incremento en la tensión superficial de  $0,05 \pm 0,015 \text{ N m}^{-1}$ .

Gotas con una tensión superficial mayor que la de la superficie del suelo permanecerán sobre la superficie sin infiltrarse, mientras que gotas con una tensión superficial menor (menor ángulo de contacto) se infiltrarán instantáneamente. La aplicación de gotas con tensión superficial decre-

Tabla 2. Clases de etanol utilizadas en la clasificación de la intensidad de la repelencia al agua del suelo. Se muestra también la equivalencia con la molaridad de etanol correspondiente (MED) y la tensión superficial aparente ( $\gamma$ , a partir de Doerr et al., 2002).

Clase de etanol	Intensidad de la repelencia al agua (Doerr, 1998)	Porcentaje de etanol (%)	MED (M)	$\gamma$ ( $\text{N m}^{-1} \cdot 10^{-3}$ )
1	Muy hidrofílico	0	0,00	72,1
2	Muy hidrofílico	1	0,17	66,9
3	Hidrofílico	3	0,51	60,9
4	Ligera	5	0,85	56,6
5	Moderada	8,5	1,45	51,2
6	Fuerte	13	2,22	46,3
7	Fuerte	18	3,07	42,3
8	Muy fuerte	24	4,09	38,6
9	Extrema	36	6,14	33,1

ciente (es decir, con concentraciones de etanol crecientes) hasta que una de las gotas resiste la infiltración permite la clasificación del suelo en una categoría determinada de tensión superficial entre dos concentraciones de etanol: aquella a la que se produce la infiltración instantánea y la solución precedente de concentración más débil. De este modo, se asume que la solución cuya gota se infiltra dentro de los primeros 5 segundos tras su aplicación tiene una tensión superficial menor a la de la superficie del suelo (Letey et al., 2000). Este intervalo de tiempo se ha escogido según los criterios de Crockford et al. (1991) y Doerr (1998).

Un método alternativo es el propuesto por King (1981), que propone un procedimiento similar, salvo porque la tensión superficial se expresa en términos de molaridad, más que como clase de concentración de etanol. Este procedimiento se conoce como test de molaridad de una gota de etanol (*Molarity of an Ethanol Droplet*, MED). En este caso, King propuso que suelos con  $\text{MED} \leq 1$  no podían ser considerados repelentes al agua. En realidad, tanto el TPE como el MED son similares, y sólo varían en los valores numéricos de las clases de porcentaje o molaridad de la solución de etanol (Tabla 2).

### Determinación directa del ángulo de contacto

Cuando una gota de agua se coloca sobre una superficie hidrofóbica, no se extiende sobre dicha superficie, sino que asume una forma que depende de la relación entre la energía libre de las superficies involucradas. Es decir, será tanto más esférica cuanto más hidrofóbica sea la superficie de apoyo.

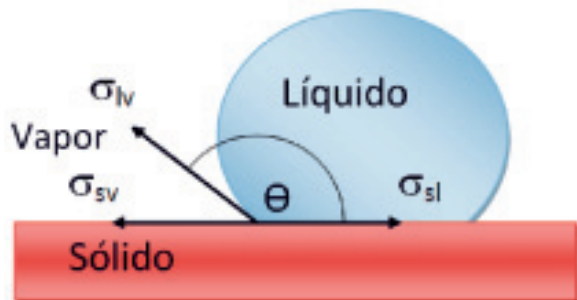


Figura 12. Ángulo de contacto de una gota de agua sobre una superficie hidrofóbica.

Ya que el contacto de una gota de agua con el suelo implica en realidad a tres fases (sólido, líquido y vapor), la intensidad de la repelencia al agua puede determinarse a partir del ángulo de contacto ( $\theta$ ) que forma la superficie de una gota de agua depositada sobre el suelo (Figura 12). Dicho ángulo de contacto depende de la relación entre la energía de las tres interfases: líquido-vapor ( $\sigma_{lv}$ ), sólido-vapor ( $\sigma_{sv}$ ) y sólido-líquido ( $\sigma_{sl}$ ). Esta relación se conoce mediante la ecuación de Young:

$$\sigma_{lv} \cos \theta = \sigma_{sv} - \sigma_{sl} \quad [1]$$

En la práctica, el ángulo de contacto sobre superficies porosas o irregulares es menor al formado sobre una superficie perfectamente plana. Cuando la superficie del suelo es repelente al agua, la gota se retrae debido a la tensión superficial y se forma un ángulo de contacto normalmente mayor de  $90^\circ$ . Si la gota moja la superficie y se extiende sobre ella, el ángulo de contacto es menor de  $90^\circ$ . Recientemente, este umbral del ángulo de contacto para la infiltración ha sido puesto en duda por Shirtcliffe et al. (2006), quienes demostraron que la infiltración puede ocurrir con ángulos de contacto considerablemente menores de  $90^\circ$ , dependiendo de factores como la forma o la granulometría de las partículas del suelo.

Para la determinación del ángulo de contacto bajo condiciones de laboratorio, las muestras de suelo deben secarse ( $25^\circ\text{C}$ ) hasta peso constante, 48 horas. Posteriormente se tamizan ( $< 2\text{ mm}$ ), retirando las partículas gruesas y homogeneizando la fracción de tierra fina. Es conveniente que las muestras se mantengan bajo condiciones de laboratorio ( $20^\circ\text{C}$  y humedad relativa del 50%) durante 7 días para eliminar los efectos potenciales de la variación de humedad atmosférica en la hidrofobicidad, como apuntan Doerr et al. (2002, 2005). Posteriormente, la muestra de suelo se dispondrá sobre una bandeja u otro tipo de recipiente adecuado para la medición del ángulo de contacto mediante observación. Si el material es fino (arena fina o de menor diámetro) puede disponerse sobre una cinta adhesiva de doble cara y fijarse a un portaobjetos de vidrio.

Tras la preparación, se coloca una gota de agua destilada sobre la superficie de la muestra de suelo. La precisión de la medida puede verse afectada por la rugosidad de la superficie de la muestra de suelo, de modo que algunos autores recomiendan emplear gotas cuyo diámetro sea al menos 20 veces mayor que el tamaño medio de partícula de la muestra de suelo (Bachmann, et al., 2000)

## Determinación indirecta del ángulo de contacto mediante el estudio del ascenso capilar

### *Método del ascenso capilar de Letey et al. (1962)*

Dependiendo de la granulometría o la estructura del suelo, la determinación directa del ángulo de contacto puede ser difícil. Algunos autores han propuesto determinaciones indirectas a la medición geométrica del ángulo de contacto.

En teoría, el sistema de poros del suelo puede ser representado como un sistema de capilares, lo que implica una gran simplificación de su compleja disposición geométrica y de la microestructura, pero resulta útil en este caso.

La ecuación de ascenso capilar es

$$h = (2 \gamma \cos \theta) / (r \rho g) \quad [2]$$

donde  $h$  es la altura del lugar,  $\gamma$  la tensión superficial líquido-aire,  $\theta$  el ángulo de contacto líquido-sólido,  $r$  el radio capilar,  $\rho$  la densidad del líquido y  $g$  la constante gravitacional. Según esta ecuación, el agua no entrará de forma espontánea la tierra si  $\cos \theta$  es cero o un número negativo ( $\theta$  igual o superior a  $90^\circ$ ). El modelo supone que un suelo se considera repelente al agua si una gota de agua colocada sobre la superficie del suelo no se infiltra espontáneamente. Letey et al. (2000) asumen que los suelos repelentes al agua muestran un ángulo de contacto en la interfase sólido-líquido igual o superior a  $90^\circ$ . Según Shirtcliffe et al. (2006), ésta es una afirmación discutible, pero puede asumirse en este caso.

Basándose en estas premisas. Letey et al. (1962) propusieron una técnica para medir el ángulo de contacto en la interfase sólido-líquido basada en el ascenso capilar. Suponiendo que el etanol es capaz de mojar el suelo con  $\theta$  igual a cero, la ecuación anterior [2] puede modificarse de la siguiente manera, añadiendo el subíndice  $e$  para representar al etanol:

$$r = (2 \gamma_e) / (h_e g \rho_e) \quad [3]$$

Este valor de  $r$  puede ser sustituido en la ecuación [2] cuando la altura del ascenso capilar se mide con el agua en el mismo suelo. Esto conduce a la ecuación para el cálculo de  $\theta_w$ , donde el subíndice  $w$  se utiliza para indicar el agua

$$\cos \theta_w = (h_w \gamma_e \rho_w) / (\gamma_w h_e \rho_e) \quad [4]$$

La suposición de que el etanol es capaz de mojar suelo con un ángulo de contacto igual a cero fue utilizado por diversos autores (Letey et al., 1962; Tillman et al., 1989) para medir la repelencia al agua de los materiales que mostraban un ángulo de contacto inicial  $<90^\circ$ .

En el caso de suelos con ángulo de contacto inicial  $\geq 90^\circ$ , el agua no se introducirá en la columna, de modo que no se producirá ningún ascenso capilar. En este caso es necesaria la inmersión de la columna de suelo en agua, de modo que la mayor presión hidráulica forzaré la entrada de agua en la columna. La magnitud del ascenso capilar en este caso puede determinarse a partir del descenso del nivel de agua fuera de la columna. Es necesario considerar que el tiempo de contacto modificará el valor de  $\theta$ , por lo que el resultado puede no ser correcto si la duración del experimento es excesiva.

### ***Método del ascenso capilar de Emerson y Bond (1963)***

Un método muy relacionado con el anterior es el desarrollado por Emerson y Bond (1963). La altura de ascenso capilar,  $h$ , en una columna vertical de suelo seco, puede definirse como la altura máxima de ascenso capilar por debajo del cual el contenido de humedad en el suelo es uniforme. En su experimento, Emerson y Bond (1963) midieron la velocidad de ascenso del frente de humedecimiento en una columna vertical de arena y la representaron gráficamente frente al inverso del ascenso capilar, calculando mediante extrapolación el valor de  $1/h$  para una velocidad de ascenso capilar igual a cero. Para ello, se basaron en la siguiente ecuación:

$$H = (2\gamma \cos \theta) / (\rho g r) \quad [5]$$

donde  $H$  es la altura de ascenso capilar,  $\gamma$  es la tensión superficial del líquido,  $\theta$  es el ángulo de contacto,  $\rho$  es la densidad del líquido ( $1 \text{ g cm}^{-3}$ , en el caso de agua destilada),  $g$  la constante de la gravedad y  $r$  el radio capilar.

También puede determinarse  $q$  a partir de la tasa de ascenso del frente de mojado por unidad de tiempo ( $Q$ ):

$$Q = P_t r (\rho r g h + 2 \gamma \cos \theta) / (8 L \eta) \quad [6]$$

donde  $P_t$  es la porosidad total del suelo,  $h$  es la longitud del capilar más el espesor del líquido por encima del capilar,  $L$  es la longitud del capilar y  $\eta$  es la viscosidad del líquido. A su vez,  $P_t$  puede calcularse a partir de la fórmula siguiente:

$$P_t = 1 - (D_a / D_r) \quad [7]$$

donde  $D_a$  es la densidad aparente del suelo y  $D_r$  la densidad real (puede asumirse como 2,65 g cm<sup>-3</sup>)

Como en el método anterior, en el caso de suelos repelentes al agua, es necesario aplicar presión hidrostática a la base de la columna para obtener un número suficiente de puntos para la extrapolación.

## CONCLUSIONES

La repelencia al agua es una propiedad de los suelos que ha sido percibida y estudiada desde hace décadas. Si bien, sólo recientemente se ha comprobado que se trata de una propiedad más general de lo inicialmente sospechado, y ha tomado una creciente importancia en el estudio de los procesos físicos, hidrológicos, erosivos e incluso nutricionales del suelo, especialmente tras la acción del fuego. Los incendios pueden modificar el comportamiento del suelo ante el agua, por lo que se requieren métodos y técnicas que puedan evaluar estos cambios. En este capítulo se han presentado los métodos más utilizados (WDPT, test del porcentaje de etanol, determinación del ángulo de contacto y método del ascenso capilar), lo que puede servir como referencia rápida para el trabajo de investigadores, estudiantes, técnicos y gestores. Sin embargo, es necesario mejorar las pruebas y desarrollar nuevos métodos que permitan caracterizar la repelencia al agua de los suelos, sus variaciones espaciales y temporales y determinar su importancia en los modelos hidrológicos.

Dado el gran número de suelos que presentan esta propiedad, especialmente en el caso de los suelos afectados por el fuego, por la sencillez de su determinación y por las importantes consecuencias hidrológicas y geomorfológicas de la repelencia al agua, su determinación debería proponerse por defecto en los análisis estándar de suelos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este capítulo desean hacer constar su agradecimiento al Dr. Artemi Cerdà (Universidad de València) por su revisión de algunos puntos del mismo, así como a Arturo J.P. Granged (Universidad de Sevilla) por sus aportaciones en la realización de las fotografías.

Los autores desean agradecer también al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación del desarrollo de la Red Temática "Efectos de los incendios forestales sobre los suelos" (CGL2007-28764-E/BTE; CGL2008-01632-E/BTE y CGL2009-06861-E/BTE).

## REFERENCIAS

- Adam, N.K. 1963. Principles of water-repellency. En: J.L. Moillet (Ed.), *Water Proofing and Water-Repellency*. Elsevier. Londres.
- Adams, S., Strain, B.R. y Adams, M.S. 1969. Water-repellent soils and annual plant cover in a desert scrub community of southeastern California. *Symposium on Water-repellent Soils, Proceedings*. University of California. Riverside, CA.
- Ammar, H., López, S., González, J. y Ranilla, M. 2004. Comparison between analytical methods and biological assays for the assessment of tannin-related antinutritive effects in some Spanish browse species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 1349-1356.
- Anderson, H.W., Hoover, M.D. y Reinhart, K.G. 1976 *Forests and water: effects of forest management on floods, sedimentation, and water supply*. General Technical Report PSW-18. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Berkeley, CA.
- Arcenegui, A., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mayoral, A.M. y Morales, J. 2007. Factors controlling the water repellency induced by fire in calcareous Mediterranean forest soils. *European Journal of Soil Science*, 58, 1254-1259.
- Arcenegui, V., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Zornoza, R., Mataix-Beneyto, J. y García-Orenes, F. 2008. Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena*, 74, 219-226
- Bachmann, J. y van der Ploeg, R.R. 2002. A review on recent developments in soil water retention theory: interfacial tension and temperature effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165, 468-478.
- Bachmann, J., Horton, R., van der Ploeg, R.R. y Woche, S.K. 2000. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 564-567.
- Bàn, S., Wolframe, E. y Rohrsetzet, S. 1987. The condition of starting of liquid imbibition in powders. *Colloids and Surfaces*, 22, 291-300.
- Barrett, G. y Slaymaker, O. 1989. Identification, characterization and hydrological implications of water repellency in mountain soils, Southern British Columbia. *Catena*, 16, 477-489.
- Bauters, T.W.J., Steenhuis, T.S. y Parlange, J.Y. 1998. Preferential flow in water-repellent sands. *Soil Science of America Journal*, 62, 1185-1190.
- Bayliss, J.S. 1911. Observations on *Marasmius oreades* and *Clitocybe gigantea* as parasitic fungi causing fairy rings. *Journal of Economic Biology*, 6, 111-132.
- Benito, E., Santiago, J.L., de Blas, E. y Varela, M.E. 2003. Deforestation of water-repellent soils in Galicia (NW Spain): effects on surface runoff and erosion under simulated rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 145-155.
- Bisdom, E.B.A., Dekker, L.W. y Schoute, J.F.Th. 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 56, 105-118.
- Blackwell, P.S. 1993. Improving sustainable production from water repellent sands. *Western Australia Journal of Agriculture*, 34, 160-167.
- Blanco-Canqui, H. y Lal, R. 2009. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma* 149:171-180.
- Bonell, M. y Williams, J. 1986. The generation and redistribution of overland on massive oxic soil in a eucalypt woodland within the semiarid tropics of north Australia. *Hydrological Processes*, 1, 31-46.
- Bornemisza, E. 1964. Wettability of soils in relation to their physio-chemical properties. Unpublished PhD thesis. University of Florida. *Dissertation Abstracts*, 64, 3771.
- Brock, J.H. y DeBano, L.F. 1990. Wettability of an Arizona chaparral soil influenced by prescribed burning. General Technical Report RM-191. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Tucson, AZ.
- Brown, A.A. y Davis, K.P. 1973. *Forest fire: control and use*. McGraw-Hill. New York, NY.
- Buczko, U., Bens, O., Fischer, H. y Hüttl, R.F. 2002. Water repellency in sandy luvisols under different forest transformation stages in northeast Germany. *Geoderma*, 109, 1-18.



- Burch, G.J., Moore, I.D. y Burns, J. 1989. Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. *Hydrological Processes*, 3, 211-222.
- Busse, M.D., Hubbert, K.R., Fiddler, G.O., Shestak, C.J. y Powers, R.F. 2005. Lethal soil temperatures during burning of masticated forest residues. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 267-276.
- Campbell, R.E., Baker, M.B. y Follitt, P.F. 1977. Wildfire effects on a ponderosa pine ecosystem: an Arizona case study. USDA Forest Service Papers, RM-191. Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Fort Collins, CO.
- Cann, M. y Lewis, D. 1994. The use of dispersible sodic clay to overcome water repellence in sandy soils in the South East of South Australia. *Proceedings of the 2nd National Water Repellency Workshop*, 1-5 August. Perth, WA.
- Capriel, P., Beck, T., Borchert, H., Gronholz, J. y Zachmann, G. 1995. Water repellency of the organic matter in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 27, 1453-1458.
- Carballeira, A. 1980. Phenolic inhibitors in *Erica australis* L. and in associated soil. *Journal of Chemical Ecology*, 6:593-596.
- Carter, D.J. y Hetherington, R.E. 1994. Claying of water repellent soils on the South Coast of Western Australia. *Proceedings of the 2nd National Water Repellency Workshop*, 1-5 August. Perth, WA.
- Carter, D.J., Hetherington, R.E., Morrow, G. y Nicholson, D. 1994. Trends in water repellency measurements from soils sampled at different soil moisture and land use. *Proceedings of the 2nd National Water Repellency Workshop*, 1-5 August 1994, Perth, WA.
- Cerdà, A. y 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., Schnabel, S., Ceballos, A. y Gomez-Amelia, D. 1998. Soil hydrological response under simulated rainfall in the Dehesa land system Extremadura, SW Spain. under drought conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 195-209.
- Chan, K.Y. 1992. Development of seasonal water-repellence under direct drilling. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 326-329.
- Chandler, C.P., Cheney, P., Thomas, P., Traub, L. y Williams, D. 1991. *Fire in forestry-Volume I: Forest fire behavior and effects*. John Wiley y Sons, Inc. New York, NY.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1479-1486.
- Conde., E., Cadahia, E., García-Vallejo, M.C. y Fernández de Simón, M.B. 1995. Polyphenolic composition of wood extracts from *Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus* and *E. rudis*. *Holzforschung*, 49, 411-417.
- Conde, E., Cadahia, E., García-Vallejo, M. C. y Fernández de Simón, B. 1998. Polyphenolic composition of *Quercus suber* cork from different Spanish provenances. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 3166-3171.
- Crockford, S., Topalidis, S. y Richardson, D.P. 1991. Water repellency in a dry sclerophyll forest-measurements and processes. *Hydrological Processes*, 5, 405-420.
- de Jonge, L.W., Jacobsen, O.H. y Moldrup, P. 1999. Soil water repellency: effects of water content, temperature and particle size. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 437-442.
- DeBano, L.F. 1966. Formation of non-wettable soils involves heat transfer mechanism. *Research Notes PSW-132*. Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Berkeley, CA.
- DeBano, L.F. 1971. The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35, 340-343.
- DeBano, L.F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. *General Technical Report, PSW-46*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Berkeley, CA.
- DeBano, L.F. 1991. The effect of fire on soil. En: A.E. Harvey y L.F. Neuenschwander (Eds.). *Management and productivity of western-montane forest soils*. *General Technical Report INT-280*. Intermountain Forest and Range Experimental Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Ogden, UT.



- DeBano, L.F. 2000a. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology*, 231-232, 4-32.
- DeBano, L.F. 2000b. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: A review. *Journal of Hydrology*, 231-232, 195-206.
- DeBano, L.F. y Krammes, J.S. 1966. Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 2, 14-19.
- DeBano, L.F. y Neary, D. 2005. The soil resource: its importance, characteristics, and general responses to fire. En: D. Neary, K.C. Ryan y L.F. DeBano (Eds.). *Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on soil and water. General Technical Report 42-4*. Rocky Mountain Research Station. United States Department of Agriculture, Forest Service. Ogden, UT.
- DeBano, L.F., Mann, L.D. y Hamilton, D.A. 1970. Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. *of the Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 130-133.
- DeBano, L.F., Savage, S.M. y 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., Rice, R.M. y Conrad, C.E. 1979. Soil heating in chaparral fires: effects on soil properties, plant nutrients, erosion and runoff. Paper PSW-145. Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Berkeley, CA.
- DeBano, L.F., Neary, D. y Ffolliot, P. 1998. *Fire effects on ecosystems*. John Wiley y Sons. New York, NY.
- DeBano, L.F., Neary, D. y Ffolliot, P. 2005. Soil physical properties. En: D. Neary, K.C. Ryan y L.F. DeBano (Eds.). *Wildland fire in ecosystems. Effects of fire on soil and water. General Technical Report 42-4*. Rocky Mountain Research Station. United States Department of Agriculture, Forest Service. Washington, DC.
- Dekker, L.W. y Ritsema, C.J. 1994. How water moves in a water-repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30, 2507-2517.
- Dekker, L.W. y Ritsema, C.J. 1995. Fingerlike wetting patterns in two water-repellent loam soils. *Journal of Environmental Quality*, 24, 324-333.
- Dekker, L.W. y Ritsema, C.J. 1996a. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena*, 28, 89-105.
- Dekker, L.W. y Ritsema, C.J. 1996b. Preferential flow paths in a water repellent clay soil with grass cover. *Water Resources Research*, 32, 1239-1294.
- Dekker, L.W. y Ritsema, C.J. 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology*, 231-232, 248-164.
- Dlapa, P., Doerr, S.H., Lichner, L., Sir, M. y Tesar, M. 2004. Effect of kaolinite and Ca-montmorillonite on the alleviation of soil water repellency. *Plant, Soil and Environment*, 50, 358-363
- Doerr, S.H. 1998. On standardising the "Water Drop Penetration Time" and the "Molarity of an Ethanol Droplet" techniques to classify soil water repellency: a case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 663-668.
- Doerr, S.H. y 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. y Shakesby, R.A. 2009. Soil water repellency. Principles, causes and relevance in fire-affected environments. En: A. Cerdà y J. Mataix-Solera (Eds.). *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. Universitat de València. Valencia.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A. y Walsh, R.P.D. 1996. Soil hydrophobicity variations with depth and particle size fraction in burned and unburned *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* forest terrain in the Águeda Basin, Portugal. *Catena*, 27, 25-47.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A. y Walsh, R.P.D. 1998. Spatial variability of soil water repellency in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. *Soil Science*, 163, 313-324.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A. y Walsh, R.P.D. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51, 33-65.
- Doerr, S.H., Dekker, L.W., Shakesby, R.A., Ritsema, C.J. y Bryant, R. 2002. Water repellency of soils: the influence of ambient relative humidity. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 401-405.

- Doerr, S.H., Ferreira, A.J.D., Walsh, R.P.D., Shakesby, R.A., Leighton-Boyce, G. y Coelho, C.O.A. 2003. Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal. *Hydrological Processes*, 17, 363-377.
- Doerr, S.H., Llewellyn, C.T., Douglas, P., Morley, C.P., Mainwaring, K.A., Haskins, C., Johnsey, L., Ritsema, C.J., Stagnitti, F., Allison, G., Ferreira, A.J.D., Keizer, J.J., Ziegler, A.K. y Diamantis, J. 2005. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different origin. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 225-237.
- Domingo, W.R. 1950. Some notes on irreversibly dried difficultly wettable soils. *Landbouwkund Tijdschr*, 62, 252-260.
- Dunne, T. y Black, R. 1970. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6, 478-490.
- Emerson, W.W. y Bond, R.D. 1963. The rate of water entry into dry sand and calculation of the advancing contact angle. *Australian Journal of Soil Research*, 1, 9-16.
- Feeney, D.S., Hallett, P.D., Rodger, S., Bengough, A.G., White, N.A. y Young, I.M. 2006. Impact of fungal and bacterial biocides on microbial induced water repellency in arable soil. *Geoderma*, 135, 72-80.
- Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Walsh, R.P.D., Shakesby, R.A. y Doerr, S.H. 2000. Hydrological implications of soil water-repellency in *Eucalyptus globulus* forests, north-central Portugal. *Journal of Hydrology*, 231-232, 165-177.
- Franco, C.M.M., Tate, M.E. y Oades, J.M. 1995. Studies on non-wetting sands: I. The role of intrinsic particulate organic matter in the development of water repellency in non-wetting sands. *Australian Journal of Soil Research*, 33, 253-263.
- Franco, C.M.M., Clarke, P.J., Tate, M.E. y Oades, J.M. 2000. Studies on non-wetting sands: II. Hydrophobic properties and chemical characterisation of natural water-repellent materials. *Journal of Hydrology*, 231-232, 47-58.
- Fuentes, E.R., Segura, A.M. y Holmgren, M. 1994. Are the response of matorral shrubs different from those in an ecosystem with a reputed fire history?. En: Moreno, J.M., Oechel, W.C. (eds), *The Role of Fire in Mediterranean-Type Ecosystems*. Springer-Verlag. New York, NY.
- García-Corona, E., Benito de Blas, E. y Varela, M.E. 2004. Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 195-199.
- Giovannini, G. 1994. The effect of fire on soil quality. En: M. Sala, J.L. Rubio (Eds.). *Soil Erosion as a Consequence of Forest Fires*. Geofoma Ediciones. Logroño.
- Giovannini, G. y Lucchesi, S. 1983. Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates. *Soil Science*, 136, 231-236.
- Giovannini, G., Lucchesi, S. y Cervelli, S. 1987. The natural evolution of a burnt soil: a three-year investigation. *Soil Science*, 143, 220-226.
- Graber, E.R., Tagger, S., Wallach, R. 2009. Role of divalent fatty acids in soil water repellency. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 541-549.
- Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., García-Orenes, F. y Gómez, I. 2001. Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils. *Arid Land Research and Management*, 15, 163-171.
- Hafizoglu, H., Holmbom, B. y Reunanen, M. 2002. Chemical composition of lipophilic and phenolic constituents of barks from *Pinus nigra*, *Abies bornmülleriana* and *Castanea sativa*. *Holzforschung*, 56, 257-260.
- Hallett, P.D. y Young, I.M. 1999. Changes to water repellency of soil aggregates caused by substrate induced microbial activity. *European Journal of Soil Science*, 50, 35-40.
- Hallett, P.D., Ritz, K. y Wheatley, R.E. 2001. Microbial derived water repellency in soil. *International Turfgrass Society Research Journal*, 9, 518-524.
- Harper, R.J. y Gilkes, R.J. 1994. Soil attributes related to water-repellency and the utility of soil survey for predicting its occurrence. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 1109-1124.

- Harper, R.J., McKissock, I., Gilkes, R.J., Carter, D.J. y Blackwell, P.S. 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and land use on water repellency. *Journal of Hydrology*, 231-232, 371-383.
- Hartford, R.A. y Frandsen, W.H. 1992. When it's hot, it's hot ... or maybe it's not (surface flaming may not portend extensive soil heating). *International Journal of Wildland Fire*, 2, 139-144.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, CA.
- Horne, D.J. y McIntosh, J.C. 2000. Hydrophobic compounds in sands in New Zealand; extraction, characterization and proposed mechanisms for repellency expression. *Journal of Hydrology*, 231-232, 35-46.
- House, M.G. 1991. Select Committee Enquiry into Land Conservation, Legislative Assembly, Perth, Western Australia.
- Hubbert, K.R., Preisler, H.K., Wohlgemuth, P.M., Graham, R.C. y Narog, M.G. 2006. Prescribed burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA. *Geoderma*, 130, 284-298
- Hudson, J., Kellman, M., Sanmugadas, K. y Alvarado, C. 1983. Prescribed burning *Pinus occarpa* in Honduras. *Forest Ecology and Management*, 5, 269-81
- Hudson, R.A., Traina, S.J. y Shane, W.W. 1994. Organic matter comparison of wettable and non-wettable soils from bentgrass sand greens. *Journal of the Soil Science Society of America*, 58, 361-367.
- Imeson, A.C., Verstraten, J.M., Van Mullingen, E.J. y Sevink, J. 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forests. *Catena*, 19, 345-361.
- Inbar, M., Tamir, M. y Wittenberg, L. 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*, 24, 17-33.
- Ito, H., Yamaguchi, K., Kim, T-H., Khenouf, S., Gharzouli, K. y Yoshida, T. 2002. Dimeric and trimeric hydrolyzable tannins from *Quercus coccifera* and *Quercus suber*. *Journal of Natural Products*, 65, 339-345.
- Jamison V.C. 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.
- Jamison, V.C. 1943. The slow reversible drying of sandy surface soils beneath citrus trees in central Florida. *Soil Science Society of America Journal*, 7, 36-41.
- Jamison, V.C. 1946. Resistance to 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.
- Jaramillo, D.F. 2004. *Repelencia al agua en suelos. Con énfasis en Andisoles de Antioquía*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Jaramillo, D.F., Dekker, L.W., Ritsema, C.J. y Hendrickx, J.M.H. 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology*, 231-232, 105-111.
- Jaynes, W.F. y Boyd, S.A. 1991. Hydrophobicity of siloxane surfaces in smectites as revealed by aromatic hydrocarbon adsorption from water. *Clay and Clay Minerals*, 39, 428-436.
- Jordán, A., Martínez-Zavala, L. y Bellinfante, N. 2008. Heterogeneity in soil hydrological response from different land cover types in southern Spain. *Catena*, 74, 137-143.
- Jordán, A., Zavala, L.M., Nava, A.L. y Alanís, N. 2009. Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena*, 79, 60-71.
- Jordán, A., González, F.A. y Zavala, L.M. 2010. Re-establishment of soil water repellency after destruction by intense burning in a Mediterranean heathland (SW Spain), *Hydrological Processes*, 24, 736-748.
- Jungerius, P.D. y de Jong, J.H. 1989. Variability of water repellence in the dunes along the dutch coast. *Catena*, 16, 491-497.
- Jungerius, P.D. y van der Meulen, F. 1988. Erosion processes in a dune landscape along the Dutch coast. *Catena*, 15, 217-228.
- Keeley, J.E. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested use. *International Journal of Wildland Fire*, 18, 116-126.

- Keizer, J.J., Coelho, C.O.A., Shakesby, R.A., Domingues, C.S.P., Malvar, M.C., Perez, I.M.B., Matias, M.J.S. y Ferreira, A.J.D. 2005. The role of soil water repellency in overland flow generation in pine and eucalypt forest stands in coastal Portugal. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 337-350.
- Keizer, J.J., Doerr, S.H., Malvar, M.C., Ferreira, A.J.D. y Pereira, V.M.F.G. 2007. Temporal and spatial variations in topsoil water repellency throughout a crop-rotation cycle on sandy soil in north-central Portugal. *Hydrological Processes*, 21, 2317-2324.
- 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. *Australian Journal of Soil Research*, 19, 275-285.
- Kramer, P.J. 1974. Relaciones hídricas de suelos y plantas. Edutex SA. México DF.
- Langmuir, I. 1920. The mechanism of the surface phenomena of flotation. *Transactions of the Faraday Society*, 15, 62-74.
- Leighton-Boyce, G., Doerr, S.H., Shakesby, R.A. y 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 agent on in situ soil. *Hydrological Processes*, 21, 2337-2345.
- Letey, J. 2001. Causes and consequences of fire induced soil water repellency. *Hydrological Processes*, 15, 2867-2875.
- Letey, J., Osborn, J. y Pelishek, R.E. 1962. Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. *Soil Science*, 93, 149-153
- Letey, J., Carrillo, M.L.K. y Pang, X.P. 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology*, 231-232, 61-65.
- Lewis, S.A., Wu, J.Q. y Robichaud, P.R. 2006. Assessing burn severity and comparing soil water repellency, Hayman Fire, Colorado. *Hydrological Processes*, 20, 1-16.
- Lichner, L., Dlapa, P., Doerr, S.H. y Mataix-Solera, J. 2006. Evaluation of different clay minerals as additives for soil water repellency alleviation. *Applied Clay Science*, 31, 238-248.
- Ma'shum, M., Farmer, V.C. 1985. Origin and assessment of water repellence of a sandy south Australian soil. *Australian Journal of Soil Research*, 23, 623-626.
- Ma'shum, M., Tate, M.E., Jones, G.P. y Oades, J.M. 1988. Extraction and characterisation of water-repellent material from Australian soils. *Soil Science*, 39, 99-110.
- Mallik, A.U. y Rahman, A.A. 1985. Soil water repellency in regularly burned *Calluna* heathlands: comparison of three measuring techniques. *Environmental Management*, 20, 207-218.
- Martínez-Zavala, L. y Jordán-López, A. 2009. Influence of different plant species on water repellency in Mediterranean heathland soils. *Catena*, 76, 215-223.
- Mataix-Solera, J. y Doerr, S.H. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forest in southeastern Spain. *Geoderma*, 118, 77-88.
- Mataix-Solera, J. y Guerrero, C. 2007. Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. En: J. Mataix-Solera (Ed.). *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*. CEMACAM. Font Roja-Alcoi. Pp: 5-40.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Guerrero, C., Mayoral, A.M., Morales, J., González, J., García-Orenes, F. y 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., Arcenegui, V., Guerrero, C., Dlapa, P., Tessler, N. y Wittenberg, L. 2008. Can terra rossa become water repellent by burning? A laboratory approach. *Geoderma*, 147, 178-184.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Arcenegui, V., Bárcenas, G., Zornoza, R., Pérez-Bejarano, A., Bodí, M.B., Mataix-Beneyto, J., Gómez, I., García-Orenes, F., Navarro-Pedreño, J., Jordán, M.M., Cerdà, A., Doerr, S.H., Úbeda, X., Outeiro, L., Jordán, A. y Zavala, L.M. 2009. Los incendios forestales y el suelo: un resumen de la investigación realizada por el Grupo de Edafología Ambiental de la UMH en colaboración con otros grupos. En: A. Cerdà y J. Mataix-Solera (Eds.). *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles*. Universitat de Valencia. Valencia.

- McGhie, D.A. y Posner, A.M. 1981. The effect of plant top material on the water repellence of fired sands and water-repellent soils. *Australian Journal of Agricultural Research*, 32, 609-620.
- McGlynn, B.L., McDonnell, J.J. y Brammer, D.D. 2002. A review of the evolving perceptual model of hills-lope flowpaths at the Maimai catchments, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 257, 1-26.
- McHale, G., Shirtcliffe, N.J. y Newton, M.I. 2004. Super-hydrophobic and super-wetting surfaces: analytical potential? *Analyst*, 129, 284-287.
- McIntosh, J.C. y Horne, D.J. 1994. Causes of repellency: I. The nature of the hydrophobic compounds found in a New Zealand development sequence of yellow-brown sands. *Proceedings of the 2nd National Water Repellency Workshop*, 1-5 August. Perth, WA.
- McKissock, I., Walker, E.L., Gilkes, R.J. y Carter, D.J. 2000. The influence of clay type on reduction of water repellency by applied clays: a review of some West Australian work. *Journal of Hydrology*, 231-232, 323-332.
- McNabb, D.H., Gaweda, F. y Fröhlich, H.A. 1989. Infiltration, water repellency, and soil moisture content after broadcast burning a forest site in southwest Oregon. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44, 87-90.
- Miyata, S., Kosugi, K., Gomi, T., Onda, Y. y Mizuyama, T. 2007. Surface runoff as affected by soil water repellency in a Japanese cypress forest. *Hydrological Processes*, 21, 2365-2376.
- Moral, F.J., Giráldez, J.V. y Laguna, A.M. 2002. La hidrofobia en los suelos arenosos del parque natural de doñana: caracterización y distribución. *Ingeniería del Agua*, 9, 37-50.
- Moral García, F.J., Dekker, L.W., Oostindie, K. y Ritsema, C.J. 2005. Water repellency under natural conditions in sandy soils of southern Spain. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 291-296.
- Morley, C.P., Mainwaring, K.A., Doerr, S.H., Douglas, P., Llewellyn, C.T. y Dekker, L.W. 2005. Identification of hydrophobic compounds in a sandy soil under permanent grass cover. *Australian Journal of Soil Research*, 43, 239-249.
- Nasseri, I. 1988. Frequency of floods from a burned chaparral watershed. *Proceeding of the symposium on fire and watershed management. General Technical Report PSW-109. United States Department of Agriculture, Forest Service. Berkeley, CA.*
- Naveh, Z. y Lieberman, A. 1984. *Landscape Ecology. Theory and Applications.* Springer-Verlag. New York, NY.
- Osborn, J.R., Pelishek, R.E., Krammes, J.S. y Letey, J. 1964. Soil wettability as a factor in erodibility. *Soil Science Society of America Proceedings*, 28, 294-295.
- Pardini, G., Gispert, M. y Dunjó, G. 2004. Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Science of the Total Environment*, 328, 237-246.
- Parker, S.D. 1987. *Encyclopedia of Science and Technology.* McGraw-Hill. New York, NY.
- Pierson, F.B., Robichaud, P.R., Moffet, C.A., Spaeth, K.E., Williams, C.J., Hardegee, S.P. y Clark, P.E. 2008. Soil water repellency and infiltration in coarse-textured soils of burned and unburned sagebrush ecosystems. *Catena*, 74, 98-108.
- Prosser, I.P. y Williams, L. 1998. The effect of wildfire on runoff and erosion in native eucalyptus forest. *Hydrological Processes*, 12, 251-265.
- Reeder, C.J. y Juergensen, M.F. 1979. Fire-induced water repellency in forest soils of upper Michigan. *Canadian Journal of Forest Research*, 9, 369-373.
- Rice, K.C. y Hornburger, G.M. 1998. Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested, headwater catchment. *Water Resources Research*, 34, 1755-1766.
- Ritsema, C.J. y Dekker, L.W. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil: 2. Dynamics of fingered flow. *Water Resources Research*, 30, 2519-2531.
- Ritsema, C.J., Dekker, L.W., Hendrickx, J.M.H. y Hamminga, W. 1993. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*, 29, 2183-2193.
- Ritsema, C.J., Dekker, L.W. y Heijs, A.W.J. 1997. Three-dimensional fingered flow patterns in a water repellent sandy field soil. *Soil Science*, 162, 79-90.

- Ritsema, C.J., Dekker, L.W., Oostindie, K., Moore, D. y Leinauer, B. 2008. Soil water repellency and critical soil water content. En: S. Logsdon, D. Clay, D. Moore, y T. Tsegaye (Eds.). *Soil science step-by-step field analysis*. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Roberts, F.J. y Carbon, B.A. 1972. Water repellence in sandy soils of south-western Australia: 2. Some chemical characteristics of the hydrophobic skins. *Australian Journal of Soil Research*, 10, 35-42.
- Robichaud, P.R. y Hungerford, R.D. 2000. Water repellency by laboratory burning of four Rocky Mountain forest soils *Journal of Hydrology*, 232-232, 277-294.
- Rodríguez-Alleres, M., de Blas, E. y Benito, E. 2007. Estimation of soil water repellency of different particle size fractions in relation with carbon content by different methods. *Science of the Total Environment* , 378, 147-150.
- Roper, M. 1998. Sorting out sandy soils. *Microbiology Australia* 19:6-7.
- Roy, J.L. y McGill, W.B. 2000. Flexible conformation in organic matter coatings. A hypothesis about soil water repellency. *Canadian Journal of Soil Science*, 80, 143-152.
- Roy, J.L. y McGill, W.B. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Science*, 167, 83-97.
- Roy, J.L., McGill, W.B. y Rawluk, M.D. 1999. Petroleum residues as water-repellent substances in weathered nonwetable oil-contaminated soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 79, 367-80.
- Rulli, M. C. y Rosso, R. 2005. Modeling catchment erosion after wildfires in the San Gabriel Mountains of southern California. *Geophysical Research Letters* 32, L19401.
- Salminen, J.P., Roslin, T., Karonen, M., Sinkkonen, J., Pihlaja, K. y Pulkkinen, P. 2004. Seasonal variation in the content of hydrolyzable tannins, flavonoid glycosides and proanthocyanidins in oak leaves. *Journal of Chemical Ecology*, 30, 1693-1711.
- Savage, S.M. 1974. Mechanism of fire-induced water repellency in soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 38, 652-657.
- Savage, S.M., Osborn, J., Letey, J. y Heton, C. 1972. Substances contributing to fire induced water repellency in soils. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 36, 674-678.
- Schantz, E.C. y Piemeisel, F.J. 1917. Fungus fairy rings in Eastern Colorado and their effect on vegetation. *Journal of Agricultural Research*, 11, 191-245.
- Schaumann, G.E., Braun, B., Kirchner, D., Rotard, W., Szewzyk, U. y Grohmann, E. 2007. Influence of biofilms on the water repellency of urban soil samples. *Hydrological Processes*, 21, 2276-2284.
- Scheffer, F. y Schachtschabel, P. 1989. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke, Stuttgart.
- Scholl, D.B. 1975. Soil wettability and fire in Arizona chaparral. *Soil Science Society of America Proceedings*, 39, 356-361.
- Scott DF. 1993. The hydrological effects of fire in South African mountains catchments. *Journal of Hydrology*, 150, 409-432.
- Scott, D.F. 2000. Soil wettability in forested catchments in South Africa; as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. *Journal of Hydrology*, 231-232, 87-104.
- Scott, D.F. y van Wyk, D.B. 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behavior of an afforested catchment. *Journal of Hydrology*, 121, 239-256.
- Sevink, J., Imeson, A.C. y 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, 461-475.
- Shakesby, R.A., Coelho, C.O.A., Ferreira, A.D., Terry, J.P. y Walsh, R.P.D. 1993. Wildfire impacts on soil erosion and hydrology in wet Mediterranean forest, Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 3, 95-110.
- Shirtcliffe, N.J., McHale, G., Newton, M.I., Pyatt, F. y Doerr, S.H. 2006. Critical conditions for the wetting of soils. *Applied Physics Letters*, 89, 094101.
- Simard, A.J. 1991. Fire severity, changing scales, and how things hang together. *International Journal of Wildland Fire*, 1, 23-34.
- Stephens, D.B. 1996. *Vadose zone hydrology*. Lewis Publishers. Florida, CA.

REPELENCIA AL AGUA EN SUELOS AFECTADOS POR INCENDIOS:  
MÉTODOS SENCILLOS DE DETERMINACIÓN E INTERPRETACIÓN

- Tillman, R.W., Scotter, D.R., Wallis, M.G. y Clothier, B.E. 1989. Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Australian Journal of Soil Research*, 27, 637-644.
- Tschapek, M. 1984. Criteria for determining the hydrophilicity-hydrophobicity of soils. *Zeitschrift für Pflanzenernaehrung und Bodenkunde*, 147, 137-149.
- Tsukamoto, Y. 1961. An experiment on sub-surface flow. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 43, 62-67.
- Úbeda, X. y Sala, M. 1998. Variation in runoff and erosion in three areas with different fire intensities. *Geoökodynamik*, 19, 179-198.
- Urbanek, E., Hallett, P., Feeney, D. y Horn, R. 2007. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma*, 140, 147-155.
- Van't Woudt, B.D. 1959. Particle coatings affecting the wettability of soils. *Journal of Geophysical Research*, 64, 263-267.
- Velmulapalli, G.K. 1993. *Physical Chemistry*. Prentice-Hall, London, 991 pp.
- Wallach, R. y Jortzick, C. 2008. Unstable finger-like flow in water-repellent soils during wetting and redistribution-The case of a point water source. *Journal of Hydrology*, 351, 26-41.
- Wallach, R., Ben-Arie, O. y Graber, E.R. 2005. Soil water repellency induced by long-term irrigation with treated sewage effluent. *Journal of Environmental Quality*, 34, 1910-1920.
- Wallis, M.G. y Horne, D.J. 1992. Soil water repellency. *Advances in Soil Science*, 20, 91-146.
- Wallis, M.G., Horne, D.J. y McAuliffe, K.W. 1990. A study of water repellency and its amelioration in a yellow brown sand: 1. Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion. *New Zealand Journal of Agriculture Research*, 33, 139-144.
- Wallis, M.G., Scotter, D.R. y Horne, D.J. 1991. An evaluation of the intrinsic sorptivity water repellency index on a range of New Zealand soils. *Australian Journal of Soil Research*, 29, 353-362.
- Walsh, R.P.D., Coelho, C.O.A., Shakesby, R.A., Ferreira, A.D.J. y Thomas, A.D. 1995. Post-fire land use and management and runoff responses to rainstorms in northern Portugal. En: D. Mc-Gregor y D. Thompson (Eds.). *Geomorphology and Land Management in a Changing Environment*. Wiley. Chichester.
- Wander, I.W. 1949. An interpretation of the cause of resistance to wetting in Florida soils. *Science-New Series* 110. Pp: 299-300.
- Ward, P.R. y Oades, J.M. 1993. Effect of clay mineralogy and exchangeable cations on water-repellency in clay amended sandy soils. *Australian Journal of Soil Research*, 31, 351-364.
- Watson, C.L. y Letey, J. 1970. Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tension relationships. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 841-844.
- Wessel, A.T. 1988. On using the effective contact angle and the water drop penetration time for classification of water repellency in dune soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 555-562.
- Witter, J.V., Jungerius, P.D. y Ten Harkel, M.J. 1991. Modelling water erosion and the impact of water repellency. *Catena*, 18, 115-124.
- 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.
- York, C.A. y Baldwin, N.A. 1992. Dry patch on golf greens: a review. *Journal of Sports Turf Research*, 68, 7-19.
- York, C.A. y Canaway, P.M. 2000. Water repellent soils as they occur on UK golf greens. *Journal of Hydrology*, 231-232, 126-133.
- Zavala, L.M., Jordán, A., Gil, J., Bellinfante, N. y Pain, C. 2009. Intact ash and charred litter reduces susceptibility to rain splash erosion post-wildfire. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1522-1532.
- Zhang, B., Peng, X.H., Zhao, Q.G. y Hallett, P.D. 2004. Eluviation of dissolved organic carbon under wetting and drying and its influence on water infiltration in degraded soils restored with vegetation. *European Journal of Soil Science*, 55, 725-737.
- Zisman, W.A. 1964. Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. En: R.F. Gould (Ed.). *American Chemical Society. Advances in Chemistry Series*, 43, 1-51.

