

LA HIDROFOBIA EN LOS SUELOS ARENOSOS DEL PARQUE NATURAL DE DOÑANA: CARACTERIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN

Francisco Jesús Moral¹, Juan Vicente Giráldez² y Ana M^a Laguna³

Resumen:

La hidrofobia, o repelencia al agua que se manifiesta en algunos suelos, dificulta la infiltración del agua, y, consecuentemente, el establecimiento de vegetación. Como la repelencia aparece en zonas aisladas se favorecen los flujos preferenciales en su contorno. En este trabajo se muestran algunas características hidrofóbicas detectadas en los suelos arenosos del cordón dunar del litoral atlántico próximo al Parque Nacional de Doñana, analizando su origen y extensión en las áreas analizadas.

Palabras clave: Repelencia al agua; hidrología de suelos arenosos.

INTRODUCCIÓN

La repelencia al agua de un suelo dificulta el paso del agua a su través, por lo que, en ocasiones, el agua de lluvia no puede infiltrarse y queda estancada en la superficie. Esto da lugar a zonas secas en el perfil del suelo, que hacen difícil el establecimiento de plantas. En algunos casos, como son los campos de golf, los efectos de la hidrofobia, hace que se formen calvas de forma más o menos irregular, que en ocasiones son muy aparentes (Tucker y col., 1990).

La repelencia al agua era conocida desde principios de siglo, Screiner y Shorey lo mencionan en un informe de 1910 en California, (citado por Ritsema, 1998, §1.1). A pesar de ello no había sido estudiada con mucha intensidad, excepto en algunos casos de céspedes deportivos sobre suelos arenosos o como modificaciones de las propiedades físicas de los suelos como consecuencia de incendios fo-

restales (e.g. Booker y col., 1993). El grupo de la Universidad agrícola de Wageningen, (Ritsema (1998) y Dekker (1998), especialmente), ha realizado numerosos trabajos sobre repelencia en suelos. Dekker y Jungerius (1990) indicaron que en numerosas dunas costeras del litoral atlántico europeo se desarrollaba repelencia. En España, en el transcurso de un estudio de recarga en la región dunar de Huelva, contigua al Parque Nacional de Doñana, detectamos la repelencia al determinar la curva de retención de agua de una muestra de suelo. En este trabajo se exponen los primeros resultados de la exploración de la repelencia observada en la zona de El Abalario.

La repelencia del suelo al agua

La repelencia al agua mostrada por el suelo es una consecuencia del equilibrio entre las fuerzas atractivas que aparecen entre ambos, o adhesión, y las fuerzas existentes entre las moléculas del agua,

(1) Dpto. de Expresión Gráfica. Uni. de Extremadura. E.Ing.Industriales. Avda. de Elvas, s/n. 06010 Badajoz. Tel. 924 289600. e-mail: fjmoral@unex.es
(2) Dpto. de Agronomía. Uni. de Córdoba. E.T.S.I.Agrónomos y Montes. Avda. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba. Tel. 957 293333. e-mail: aglgiccej@uco.es (3) Dpto. de Física. Uni. de Córdoba. E.T.S.I.Agrónomos y Montes. Avda. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba. Tel. 957 218554. e-mail: fallalua@uco.es

Artículo recibido el 8 de mayo de 2000, recibido en forma revisada el 6 de junio de 2001 y aceptado para su publicación el 1 de octubre de 2001. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

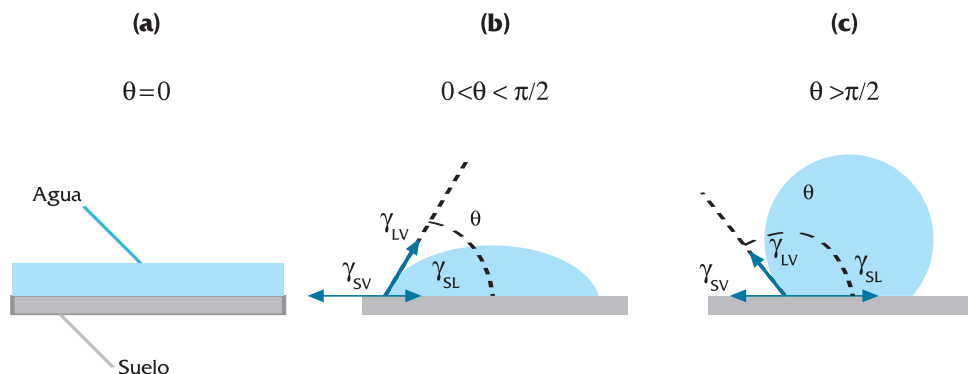


Figura 1. ángulo de contacto θ , para (a) un suelo completamente hudecible, (b) parcialmente humedecible y (c) hidrófobo γ_{sv} , γ_{lv} y γ_{sl} son las tensiones en las interfaces sólido-vapor, sólido-líquido y líquido-vapor.

cohesión, de tal modo que, como se indica en la figura 1, se establece un equilibrio de fuerzas entre la tensión en la interfaz entre el sólido y el vapor, γ_{sv} , la tensión en la interfaz entre el sólido y el líquido, γ_{sl} , y la tensión entre el líquido y el vapor, γ_{lv} ,

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta \quad (1)$$

siendo θ el ángulo de contacto. Esta ecuación, conocida como la ecuación de Young, aunque simplifica la compleja perspectiva desde el nivel microscópico, (e.g. Hunter, 1986, §5.10), ofrece una sencilla explicación de la repelencia al agua. Si las fuerzas adhesivas son menores que las fuerzas cohesivas la superficie repele al agua cuya gota adoptará la forma de esferoide aplastado, con un ángulo de contacto, $\theta > \pi/2$, similar a lo observado en la figura 2. Sin embargo, el ángulo de contacto no es la mejor forma de caracterizar la repelencia al agua de un suelo, ni el límite del ángulo recto, $\pi/2$, es un límite bien definido como sugieren Wallis y Horne (1992, §III-A), aspecto que se analizará posteriormente.



Figura 2. Gotas de agua sobre el suelo hidrófobo del Parque Natural de Doñana

La repelencia del suelo al agua se debe a impregnaciones de compuestos orgánicos que recubren parcialmente las paredes de los poros en los primeros centímetros de suelo. Como Dekker (1998, §1.3) oportunamente indica, hay unos mecanismos bien definidos que inducen la repelencia en el suelo y que este autor clasifica en los dos siguientes:

1. La impregnación de los granos del suelo por secreciones de las plantas o por otros organismos. Este caso es de los más comunes. Muchas plantas están asociadas al desarrollo de repelencia en los suelos vecinos. Wallis y Horne (1992, §IV-B.1, Tabla 1) recogen en su tabla las principales especies vegetales asociadas y excluidas. Destaca la gran variedad de plantas asociadas a la repelencia del suelo. Así, los cítricos fueron reconocidos por uno de los primeros trabajos de repelencia que mostraba las bolsas de suelo seco en perfiles húmedos en un suelo arenoso de Florida, (Jamison, 1942). También los pinos, aunque no todas las especies del género *Pinus* pertenecen a esta categoría, pues se ha observado que el *Pinus radiata* no causa repelencia. También son especies asociadas los eucaliptos, arbustos como la gayumba, y matorrales como la *Prosopis juliflora*. En la tabla de estos autores se incluye hasta cebada, si bien trigo y avena están excluidos. También se ha comprobado el papel de microorganismos como los hongos basidiomicetos y actinomicetos, aunque se reconoce que puede haber una gran variabilidad entre especies, de un modo similar a lo que ocurre con las plantas. En algún caso incluso se ha observado repelencia atribuida a hongos asociados a sistemas de cultivo reducido, (Chang, 1992), por la presencia de hifas según conjetura Emerson (1993). Hay varias formas de calvas, como los corros de brujas, atribuidos a hongos como los basidiomicetos, de las que Dekker (1998, §1.4) muestra un buen ejemplo.

No se conoce bien la naturaleza de la sustancia impregnante. Hay compuestos orgánicos en la atmósfera que son lixiviados por gotas de lluvia o rocío, o incluso por caída en seco. Estos compuestos y algún componente de la propia materia orgánica del suelo contribuyen a la hidrofobia con algunos radicales alifáticos C-H, como señala Capriel (1997), aunque hay otros muchos radicales que intervienen (Wallis y Horne, 1992, §IV-C)

2. Procesos de desecación irreversible. Se ha observado en el caso de turbas (Wallis y Horne, 1992, §IV-A.1), por un cambio en el sistema poroso, de forma similar al mecanismo de Emerson (1993). Dekker y col. (1998) observaron que la temperatura a la que se seca el suelo influye en la inducción de repelencia. El fuego es una de las causas de inducción de repelencia de mayor importancia desde la perspectiva hidrológica. Este efecto fue advertido a comienzos de la década de los sesenta en las montañas próximas a Los Angeles, (Osborn y col., 1964). Posteriormente se ha observado en muchas regiones mediterráneas (Terry, 1990). Tampoco se conoce bien el mecanismo de la inducción de hidrofobia. Savage (1974) apuntaba a una revolatilización de algunas sustancias derivadas de los residuos vegetales que hay en el suelo previamente al incendio. En cualquier caso sus consecuencias son muy aparentes como muestran los autores mencionados y Booker y col. (1993).

Los suelos arenosos muestran repelencia con mayor frecuencia que otros suelos de textura más fina. Sin embargo McGhie y Posner (1980) han detectado repelencia en suelos con un contenido de arcilla superior al 20%. Harper y Gilkes (1994) diseñaron una escala de suelos basada en la textura y consistencia del horizonte superficial con la que identificaban los suelos con repelencia al agua, que fue más severa en los suelos con menor contenido de arcilla. Así, en sus clases de suelos FCI, FCII, y

FCIII, cuyas respectivas medianas del contenido de arcilla eran 1.5, 2.5, y 4% la repelencia era más severa, pero en las otras clases, FCIV, y FCV, cuyas medianas eran 8.1 y 22.1%, prácticamente no aparecía la repelencia. McKissock y col. (1998), estudiando los suelos repelentes al agua de Australia occidental, no encontraron ninguna propiedad sencilla de los suelos que pudiese describir bien la hidrofobia, excepto que al aumentar la materia orgánica, aumentaba la repelencia al agua, y que disminuía al hacerlo el contenido de material más fino, lo que concuerda con lo que se ha observado previamente. Si se separa por tamaños las partículas de un suelo repelente, como hicieron de Jonge y col. (1999) en Dinamarca, las fracciones más finas de un suelo arenoso, con diámetros inferiores a 0.063 mm, son las que muestran mayor grado de repelencia, lo que puede deberse, según los autores al mayor contenido de materia orgánica de estos suelos. Estos mismos autores destacan cómo la repelencia se manifiesta a baja humedad, dependiendo del pretratamiento al que se hubiese sometido a los suelos. Así un mismo suelo puede manifestarse como no repelente en las condiciones de humedad del momento en que se realizó el muestreo y por el contrario ser repelente al agua a menor contenido de humedad. Es por esto por lo que se habla de repelencia actual o real en el primer caso y se define la repelencia potencial como la que presentaría un suelo que se ha secado en estufa hasta llevarlo a humedad constante (Dekker y Ritsema, 1994).

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

Con el fin de investigar la incidencia de la hidrofobia, se han seleccionado tres áreas experimentales con el mismo tipo de suelo y distinta cubierta en el Parque Natural de Doñana (figura 3). Dos de

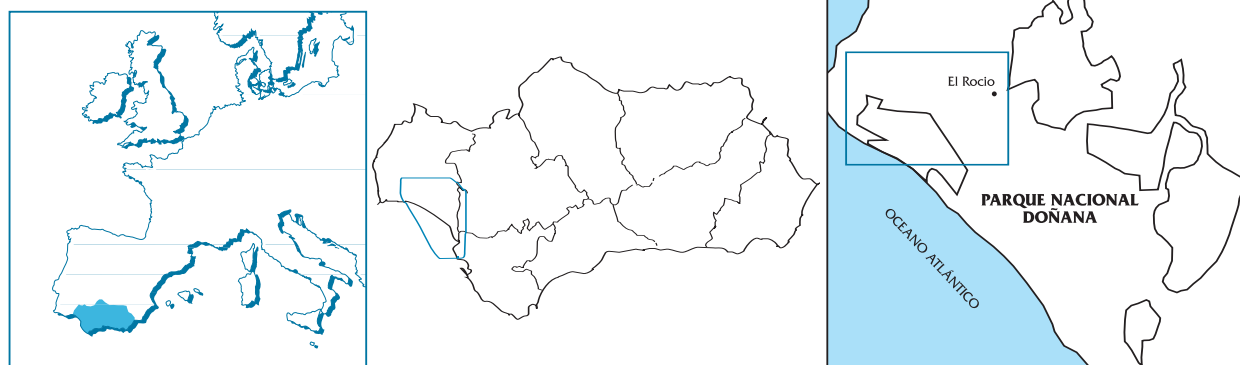


Figura 3. Localiación del Parque Natural de Doñana, delimitado por la línea negra (El Parque Nacional incluye el dominio dentro de línea verde). En azul se indica la zona que se amplía en la figura 4.

ellas están situadas en las proximidades del poblado de El Abalario y la tercera en Los Cabezudos (figura 4).



Figura 4. Localización de las zonas experimentales indicadas con rectángulos.

La zona estudiada constituye una unidad arenosa muy homogénea, formada por un manto eólico cuaternario (Holoceno) producto de la aparición sucesiva de diversos frentes de dunas, sobre la base de arenas y gravas del Plioceno-Pleistoceno (Salvany y Custodio, 1995). Las arenas más recientes forman dunas móviles, mientras que las más antiguas se encuentran estabilizadas por la vegetación. Los suelos de las zonas experimentales se clasifican como xeropsamment típicos, franco-grueso, silicio y térmico (Soil Conservation Service, 1975). En superficie se encuentra un mayor contenido en materia orgánica, consecuencia de la acumulación de restos vegetales, disminuyendo conforme se avanza por el perfil del suelo (Tabla 1). En profundidad muestra una gran homogeneidad, alcanzando un espesor de más de 3 m.

El clima es mediterráneo con regulación oceánica. La temperatura media anual es de 17.7°C. Las precipitaciones se distribuyen muy irregularmente. La precipitación media anual es de 647 mm.

En la zona de El Abalario hay un acuífero en forma de domo. Como indican Salvany y Custodio (1995, figura 8), una sección hidrológica perpendicular a la costa que pase por El Abalario y por las proximidades de Los Cabezudos, mostraría cómo las líneas de flujo del agua son verticales en las arenas holocénicas más superficiales, indicando una

gran permeabilidad vertical, y muy horizontales en las arenas más antiguas, con gran permeabilidad horizontal. Sin embargo, diversas observaciones in situ han mostrado la existencia de un importante flujo superficial en estos suelos, a pesar de que la capacidad de infiltración debería ser elevada por su alta conductividad hidráulica. No existiendo importantes desniveles, ese movimiento lateral debe atribuirse a la existencia del fenómeno de la hidrofobia.

En la zona más occidental del Parque Natural se encuentra el área de El Abalario, donde la masa forestal dominante esta compuesta por el pino piñonero (*Pinus pinea*), producto de diversas repoblaciones, fundamentalmente después de la guerra civil (Ojeda, 1987). Los pinos se encuentran acompañados de un matorral diverso (*Halimium halimifolium*, *Lavandula stoechas*, *Cistus libanotis*,...), denominado monte blanco donde la capa freática es más profunda, o monte negro (*Erica scoparia*, *Calluna vulgaris*, *Ulex australis*, *Myrtus communis*,...) donde es más somera (García y Sousa, 1997). Aquí se seleccionaron una zona de pinar y otra con suelo desnudo.

La tercera zona de estudio está situada en las proximidades de Los Cabezudos, donde se hizo reforestación con eucaliptos (*Eucalyptus globulus*) en la década de los 40 (Díaz, 1953).

Campañas de muestreo.

Para caracterizar la hidrofobia en las zonas seleccionadas se tomaron muestras del perfil del suelo excavando una serie de calicatas. Los muestreos se efectuaron en una amplia gama de condiciones ambientales, desde las más secas, en el verano, hasta las más húmedas en otoño-invierno. Para ello se llevaron a cabo tres campañas de muestreo: en El Abalario, en el área con suelo desnudo, se excavaron 8 calicatas, entre el 12 de octubre de 1995 y el 3 de septiembre de 1996; en El Abalario, en el área con predominio de pinar, se excavaron 17 calicatas entre el 20 de mayo de 1997 y el 25 de noviembre de 1998; en Los Cabezudos se realizaron 7 calicatas entre el 16 de diciembre de 1997 y el 25 de noviembre de 1998. Las profundidades de muestreo están en función de las condiciones ambientales: en

Profundidad (cm)	Materia orgánica (%)	Arcilla (%)	Arena (%)
0-20	1-1.5	4.3	92
20-30	0.3	4.3	92

Tabla 1. Características medias superficiales de los suelos de las áreas analizadas

verano, con un perfil muy seco, se consideraron los 30 o 35 cm más superficiales; en la estación de lluvias, la profundidad alcanzada era mayor en algunos casos, mientras que en otros se limitaba por la elevación del nivel freático.

En los primeros centímetros del perfil del suelo, se extrajeron muestras en intervalos pequeños, utilizándose una espátula. A mayor profundidad, las muestras de suelo se tomaron con cilindros de acero de dos tipos: unos de 450 cm³, con un diámetro de 9.8 cm y una altura de 6 cm, y otros de 100 cm³, con un diámetro y una altura de 5 cm. Los más pequeños se utilizaron cuando era precisa una toma de muestras más intensa o cuando la humedad se distribuía irregularmente. El número de muestras en cada calicata fue variable, pero en ningún caso, la distancia entre dos puntos de muestreo adyacentes superó los 25 cm. Para la toma de las muestras se presionaban los cilindros verticalmente sobre el suelo, realizándose a continuación el muestreo de la capa inferior, con objeto de minimizar las pérdidas de humedad por evaporación. El contenido de los cilindros se vaciaba dentro de bolsas de plástico, cerrándose éstas inmediatamente, hasta llegar al laboratorio en donde se analizaban.

En un primer momento, con la misma humedad que tenían las muestras en campo, se determinaron las medidas de la repelencia al agua, estableciéndose los denominados valores reales. Con posterioridad, una vez que se secaban en estufa a 90°C, permaneciendo en ella durante al menos 2 días (Dekker, 1998), se determinaron la humedad gravimétrica, la densidad aparente y las características hidrófobas de las mismas (valores potenciales).

Caracterización y medida de la hidrofobia del suelo.

Como Wallis y Horne (1992, §III) indican, la medida de la repelencia de un suelo al agua puede efectuarse de varias formas, lo que en muchos casos dificulta la comparación entre los resultados de diversos investigadores.

El ángulo de contacto es una medida que podría ser excelente, si no fuese porque la discontinuidad del medio poroso imposibilita una medición similar a la dibujada en la figura. 1. El agua penetra entre algunos poros y sólo se puede medir un ángulo de contacto 'aparente'. Sin embargo esta medida no es simple. Letey y col. (1962, citado por Wallis y Horne, 1992, §III-A1), midieron la elevación del ascenso capilar en suelos como medida alternativa,

basada en la ecuación de la capilaridad en una columna de suelo, (e.g. White, 1979, §6.1), de donde se deduce dicho ángulo. Por lo laborioso de la técnica e imprecisión de sus resultados ésta no es aconsejable. Recientemente el grupo de Letey ha propuesto una mejora de la técnica midiendo la presión que ha de aplicarse al agua para que pueda penetrar en un suelo repelente (Carrillo y col., 1999). La ventaja de la modificación de estos autores es que se puede medir el valor inicial de este ángulo que puede cambiar con el tiempo. Otra posibilidad es la determinación del ángulo directamente en una cinta adhesiva como especifican Bachmann y col. (2000).

Por la facilidad de uso, tanto en aplicaciones en campo como en laboratorio, y los buenos resultados encontrados en trabajos anteriores (e.g. Dekker, 1998; Ritsema, 1998), se eligieron las pruebas del porcentaje de alcohol y del tiempo de penetración de la gota de agua, WDPT en siglas inglesas, para determinar el grado y la persistencia de la repelencia al agua respectivamente.

La prueba del porcentaje de alcohol consiste en aplicar una gota de diversas soluciones acuosas de etanol a la muestra de suelo, midiendo el tiempo que tarda en infiltrarse (Dekker y Ritsema, 1994). Cuanto mayor es la tensión superficial del líquido aplicado, mayor es el ángulo de contacto y más lentamente se infiltra. Se disminuye la tensión superficial del líquido aumentando el contenido de etanol en la solución. De forma práctica, se expresa como el menor porcentaje de alcohol de la solución que penetra en el suelo en 5 segundos o menos (Dekker y Ritsema, 1994). Las soluciones empleadas contenían desde 1 hasta 35% de etanol, en base volumétrica.

La resistencia a la penetración puede ser caracterizada con una medida simple del tiempo que tarda una gota de agua en infiltrarse en el suelo repelente (Letey y col., 1975). Este es uno de los métodos más sencillos y más ampliamente utilizados, aunque no está exento de imprecisiones (Wallis y Horne, 1992, §III-D). Se suele denominar tiempo de penetración de la gota de agua. Para efectuar este ensayo se empleó la técnica recomendada por Dekker y Ritsema (1994), vertiendo tres gotas de agua destilada sobre el suelo y determinando el tiempo que transcurre hasta que se infiltra la segunda gota. Cuando la gota permanece sobre la muestra, se supone que el ángulo de contacto entre el sólido y el líquido es mayor de 90°. Sin embargo, la gota de agua penetrará en el suelo, lo cual indica que este ángulo

Clase	WDPT (s)	Nomenclatura
0	< 5	Humedecible o no repelente
1	5-60	Ligeramente repelente
2	60-600	Fuertemente repelente
3	600-3600	Severamente repelente
4	> 3600	Extremadamente repelente

Tabla 2. Clasificación de suelos según su WDPT (Dekker y Ritsema, 1994)

cambia con el tiempo y, por lo tanto, llega a ser menor de 90°, debido a la existencia de una interacción entre la superficie del suelo y el agua, reduciéndose la tensión superficial del líquido. Un suelo se considera hidrófobo, y así lo hacemos en este trabajo, si el tiempo de penetración de la gota de agua excede 5 segundos (e.g. Dekker y Ritsema, 1994). Este tiempo se tomó por conveniencia, no existiendo significado físico alguno que lo justifique (Richardson, 1984). Habitualmente se establecen diferentes clases de hidrofobia en función del tiempo, siendo éstas las indicadas en la Tabla 2. Con la prueba del WDPT se consigue información sobre la rapidez de la reacción entre el suelo y el agua.

Puede decirse que ambas pruebas, porcentaje de alcohol y WDPT, tienen un carácter complementario, ya que si bien es necesario cuantificar la magnitud de la hidrofobia en el suelo, con la primera, más importante, desde un punto de vista hidrológico, es la determinación de la velocidad con la cual interaccionan el suelo y el agua.

Con objeto de analizar la disposición de los materiales hidrófobos sobre las partículas de arena del suelo de las zonas experimentales, se seleccionaron algunas muestras con distintos niveles de hidrofobia. Empleando un microscopio de barrido electrónico, se obtuvieron una gran cantidad de imágenes de las diferentes muestras, con aumentos de 12, 70 y 150 veces el tamaño real. En algunos casos se eliminó la capa hidrofóbica siguiendo el método propuesto por Dekker (1998). Este método consiste en sumergir las muestras en agua oxigenada de 10 volúmenes durante al menos dos días, dejándose después secar al aire.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las diversas fotografías mencionadas anteriormente se destaca la presencia de un material que recubre parcialmente a las partículas del suelo, salvo en las muestras que fueron tratadas previamente con agua oxigenada (figura 5), por lo que se comprueba como el origen último de los parches superficiales es orgánico.

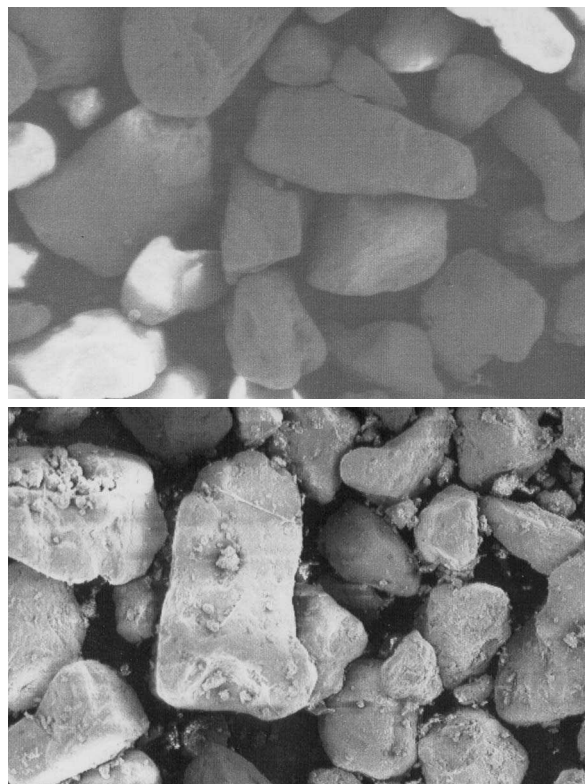


Figura 5. Fotografías, con 70 aumentos, de una muestra tratada con agua oxigenada (arriba) y muestra repelente al agua (abajo).

Aunque la cuantificación de la superficie cubierta por los restos orgánicos sobre las partículas de suelo no es posible en las imágenes, se pueden establecer unos resultados con carácter cualitativo: 1) de las imágenes obtenidas con 12 aumentos, se constata la mayor presencia de partículas finas en las muestras repelentes (figura 6). 2) Con 70 aumentos se aprecia como en las muestras repelentes existe una gran cantidad de sustancias amorfas entre los granos de arena (figura 7). 3) Con 150 aumentos se observa un recubrimiento intenso sobre las partículas de las muestras hidrófobas (figura 8).

La primera referencia sobre la existencia de hidrofobia en suelos donde la cubierta vegetal predominante está constituida por *Pinus pinea* es la tesis doctoral de Moral (1999). Se ha comprobado cómo en lugares sin vegetación o donde ésta es muy escasa, pueden desarrollarse importantes nive-

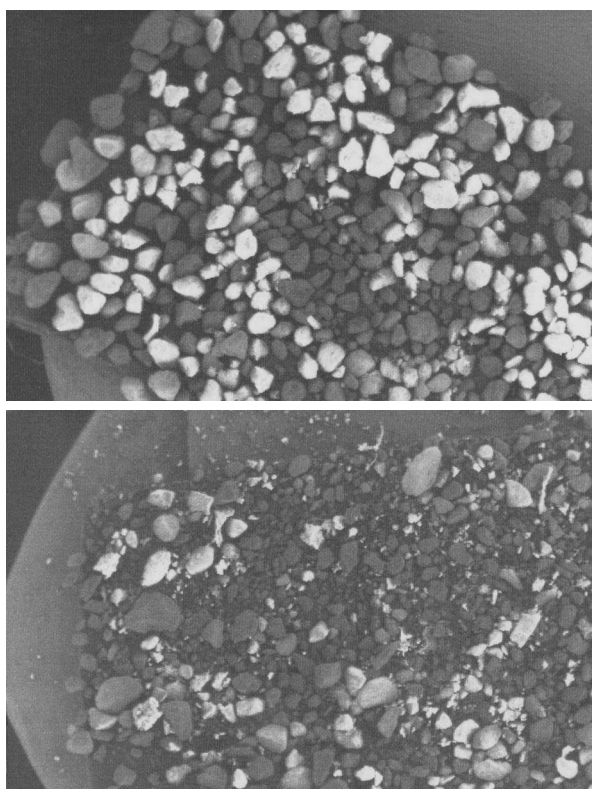


Figura 6. Fotografías, con 12 aumentos, de una muestra humedecible (arriba) y de otra repelente al agua (abajo). Se destaca la existencia de material fino en la muestra hidrófoba.

les de hidrofobia. Para que esto ocurra, debe haber existido con anterioridad un conjunto de especies vegetales dispersas que hubieran contribuido a la generación del recubrimiento orgánico de las partículas del suelo, como en las dunas de regiones costeras o en zonas desérticas (Dekker y Jungerius, 1990).

En las áreas estudiadas, a pesar de encontrarse un suelo texturalmente homogéneo, en función de la vegetación dominante se ha observado cómo el grado y persistencia de la repelencia al agua es

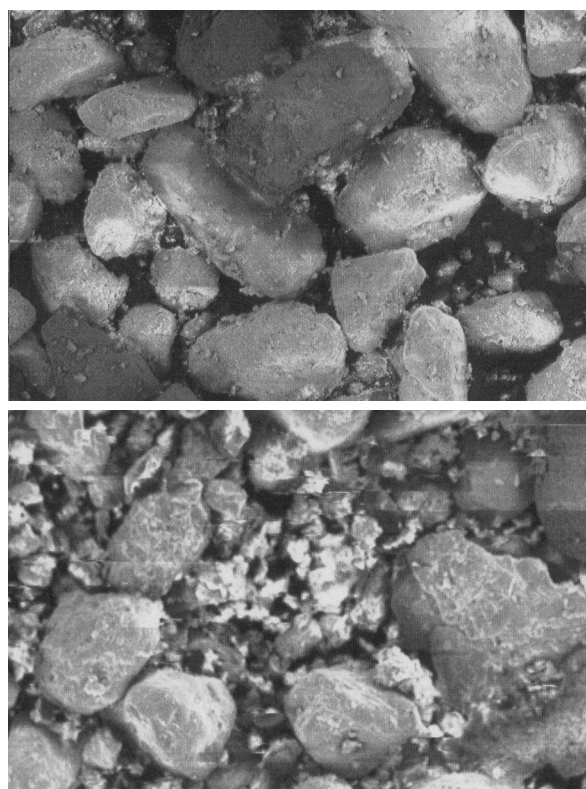
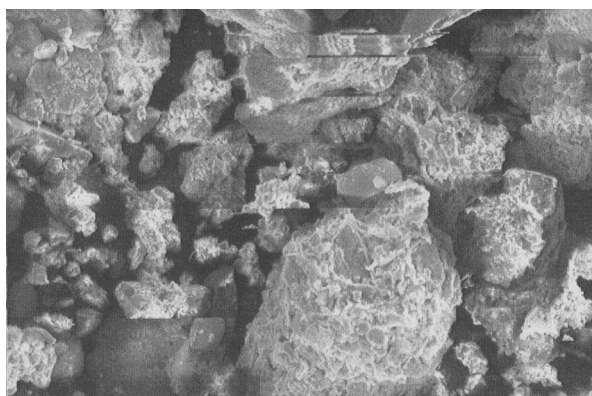


Figura 7. Fotografías, con 70 aumentos, de una muestra humedecible (arriba) y de otra repelente al agua (abajo). Se observa una gran cantidad de material intersticial en la muestra hidrófoba.

variable. La influencia, sobre el desarrollo de fenómenos hidrofóbicos, de otras especies que hubieran existido en esta zona en el pasado, se encuentra ampliamente enmascarada por las actuales

Considerando muestras repelentes aquellas cuyo WDPT es superior a 5 s, se ha observado que en el pinar de El Abalarío, la repelencia potencial se extiende sobre la mayor parte de la superficie del suelo. Así, fueron repelentes alrededor de un 70% de las muestras tomadas a menos de 2 cm de profundidad, y cerca de un 40% entre los 2 y 10 cm. La

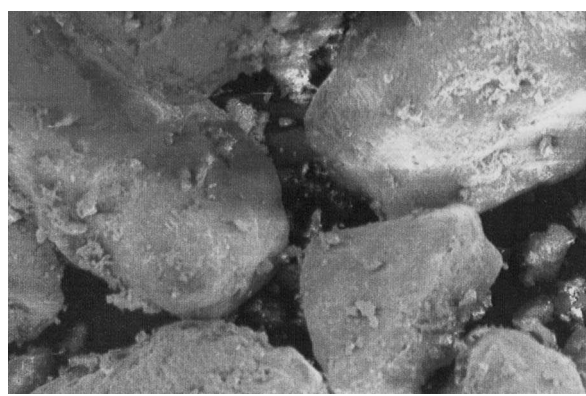


Figura 8. Fotografías, con 150 aumentos, de una muestra humedecible (izquierda) y de otra repelente al agua (derecha). Los granos de arena de la muestra hidrófoba están cubiertos por una capa extensa de materia orgánica; además, se observa la presencia de una gran cantidad de material intersticial.

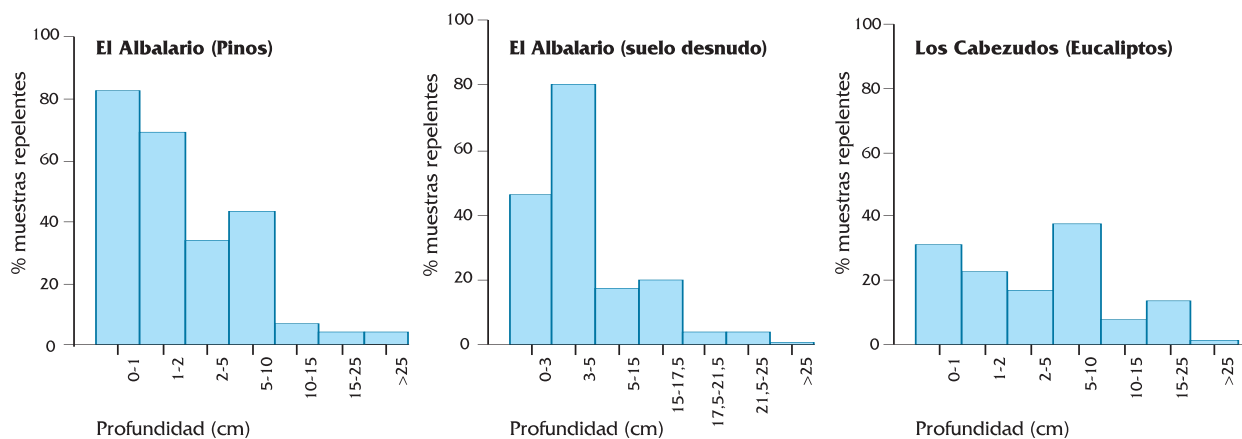


Figura 9. Distribución de la repelencia potencial al agua en zonas con distintas cubiertas vegetales.

superficie contigua con suelo desnudo presenta hidrofobia de forma menos extendida que la anterior, pero igualmente con niveles importantes. Supone más del 60% de las muestras recogidas a menos de 5 cm, disminuyendo el porcentaje con la profundidad (figura 9).

En la zona de Los Cabezudos, con predominio de *Eucalyptus globulus*, hay una menor extensión de repelencia al agua. Hasta los 10 cm de profundidad, alrededor del 30% de las muestras mostraban repelencia, proporción que se hacía casi nula a unos 25 cm (figura 9). Este resultado contrasta con los valores de hidrofobia, muy extrema en todas las muestras de suelo analizadas, encontrados por Doerr y col. (1998) en el norte de Portugal para esta misma especie.

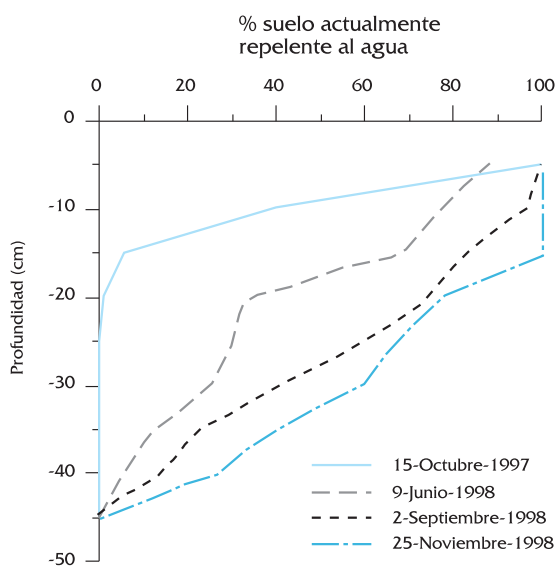


Figura 10. Distribución de la repelencia real al agua en profundidad, para las fechas indicadas, en los suelos de El Albarario con cubierta de Pinos

La cubierta vegetal aporta la mayoría de las sustancias orgánicas causantes de la repelencia. Así, se ha observado una relación entre la vegetación predominante y la presencia de hidrofobia en el suelo. Los pinos son capaces de inducir repelencia al agua en una amplia extensión superficial del suelo, mucho mayor que la detectada donde abundan los eucaliptos. En la zona de suelo desnudo, parece que la influencia de la proximidad de la masa forestal de pinos induce unos niveles de repelencia al agua considerables. Éste es un fenómeno de superficie, ya que se han encontrado muestras repelentes al agua hasta una profundidad máxima de 45 cm, desapareciendo en los horizontes más profundos. También conviene indicar que la hidrofobia real del suelo evoluciona en el tiempo de tal forma que está ligada en gran medida a las condiciones

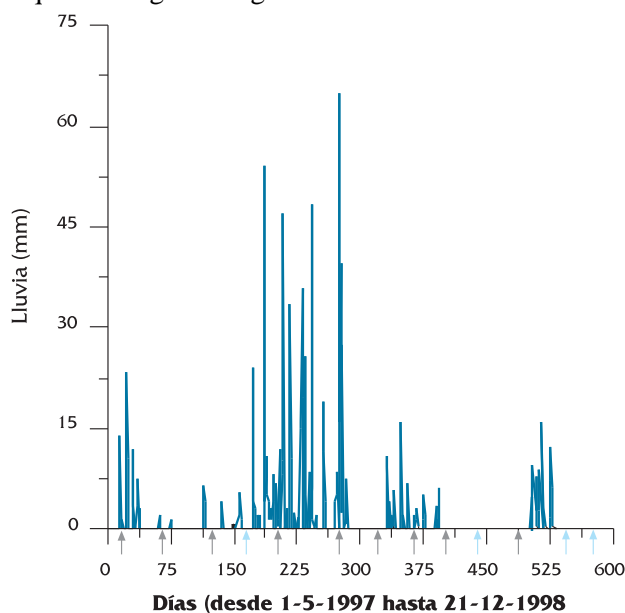


Figura 11. Distribución de la lluvia diaria durante el periodo de tiempo abarcado en la campaña de muestreo en la zona de pinar de El Albarario. Con flechas se indican los días en los que se excavaron las calicatas. Las flechas rojas muestran los días considerados en la figura 10.

LA HIDROFOBIA EN LOS SUELOS ARENOSOS DEL PARQUE NATURAL DE DOÑANA: CARACTERIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN

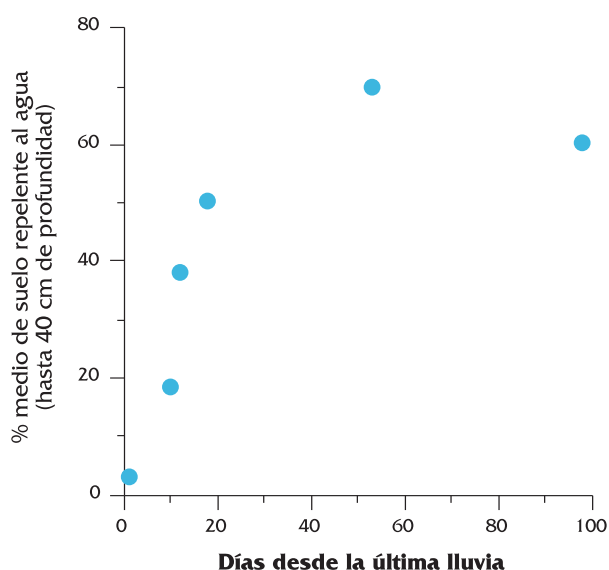


Figura 12. Extensión de la hidrofobia real en función del tiempo transcurrido desde la última lluvia

ambientales predominantes, fundamentalmente a las estaciones seca y húmeda. Por ejemplo, en la zona experimental de El Abalarío con cubierta de pinos, a pesar de detectarse repelencia potencial al agua en todas las calicatas, en alguna de ellas no se encontró hidrofobia real. Además, la extensión y la profundidad hasta la cual se manifestaba la repelencia variaba en función de las cantidades de llu-

via recogidas los días previos, condicionando el humedecimiento del suelo (figuras 10, 11 y 12).

En la figura 13 se representa, para cada zona de estudio, la intensidad de la repelencia, expresada como el grado (porcentaje de alcohol) y la persistencia del fenómeno (WDPT). En las figuras 14, 15 y 16 se recoge su distribución con la profundidad.

En la zona de pinar se observa cómo el grado de repelencia más intenso corresponde al intervalo 10-12.5, en porcentaje de alcohol, con un 23% de las muestras. Pero es destacable que un 50% de las mismas tenga un grado elevado de repelencia, superior al 15% de alcohol. Con respecto a la persistencia de la hidrofobia, la mayoría de las muestras, un 55%, son ligeramente repelentes, si bien un 15% se clasifican como extremadamente repelentes, siendo difícil humedecer completamente el suelo y presentando bolsas secas durante la mayor parte del año, incluso en épocas con abundancia de precipitaciones.

Los valores más extremos del porcentaje de alcohol aparecen en los horizontes más superficiales, a menos de 10 cm de profundidad, figura 13. En particular, porcentajes de alcohol mayores de un 20% son más frecuentes desde 1 hasta 10 cm, ya que en superficie se produce un lixiviado de los compuestos que causan la hidrofobia.

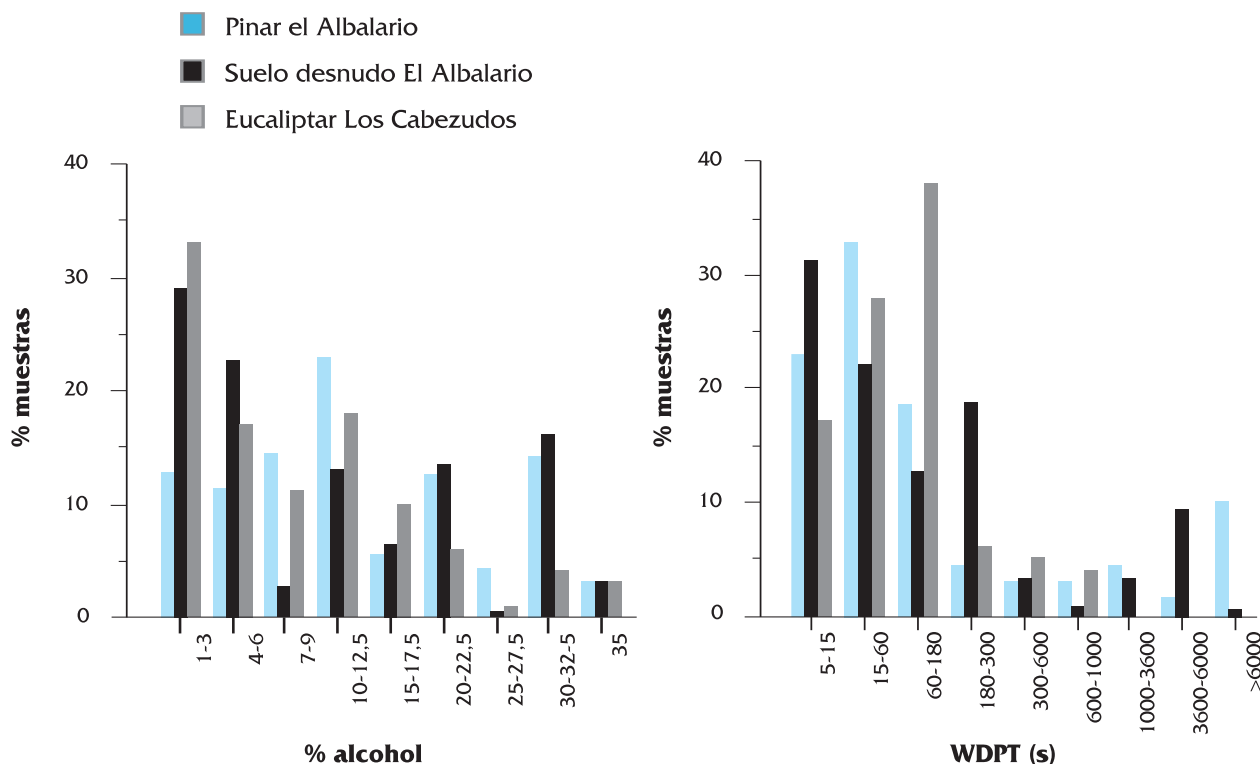


Figura 13. Caracterización del grado (porcentaje de alcohol) y persistencia (WDPT en s) de la repelencia potencial al agua en las tres zonas estudiadas.

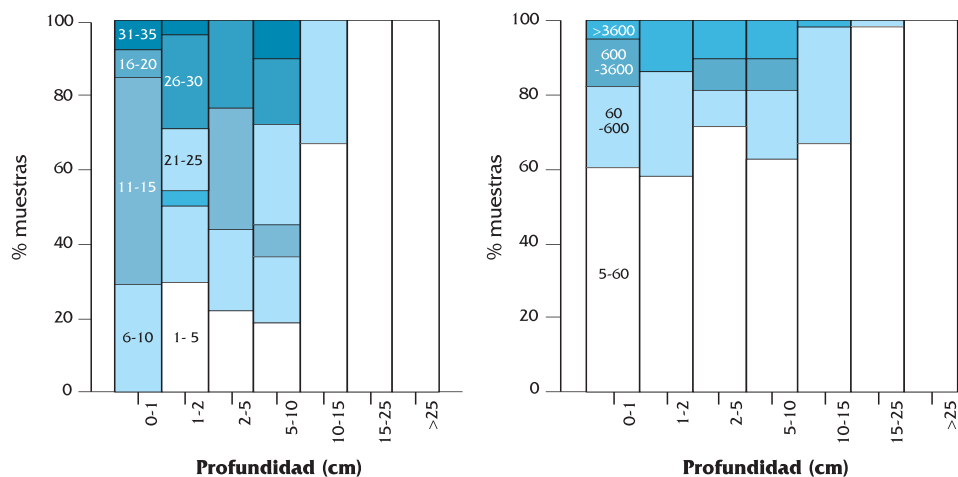


Figura 14. Distribución del grado (izquierda, porcentaje de alcohol) y persistencia (derecha, WDPT en s) de la repelencia potencial al agua de los suelos de El Abalarío, en zonas de pinar.

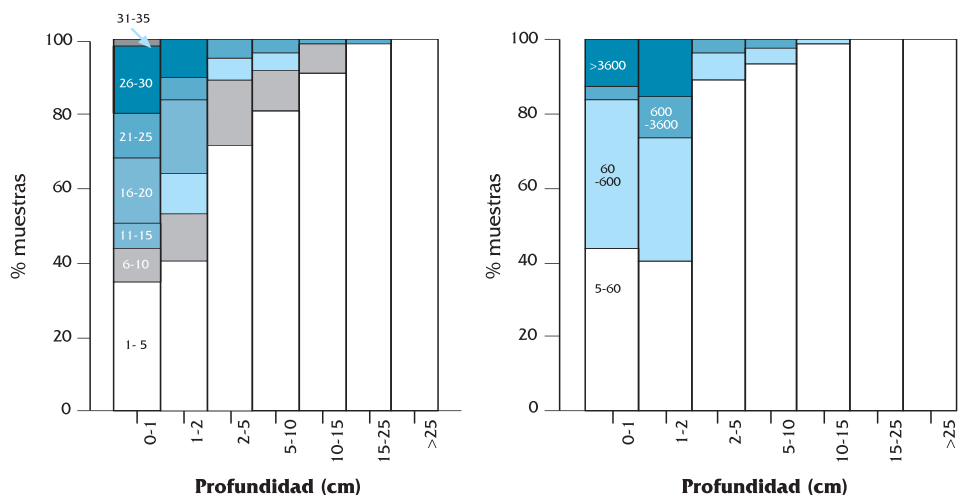


Figura 15. Distribución del grado (izquierda, porcentaje de alcohol) y persistencia (derecha, WDPT en s) de la repelencia potencial al agua de los suelos de El Abalarío, en zonas desnudas.

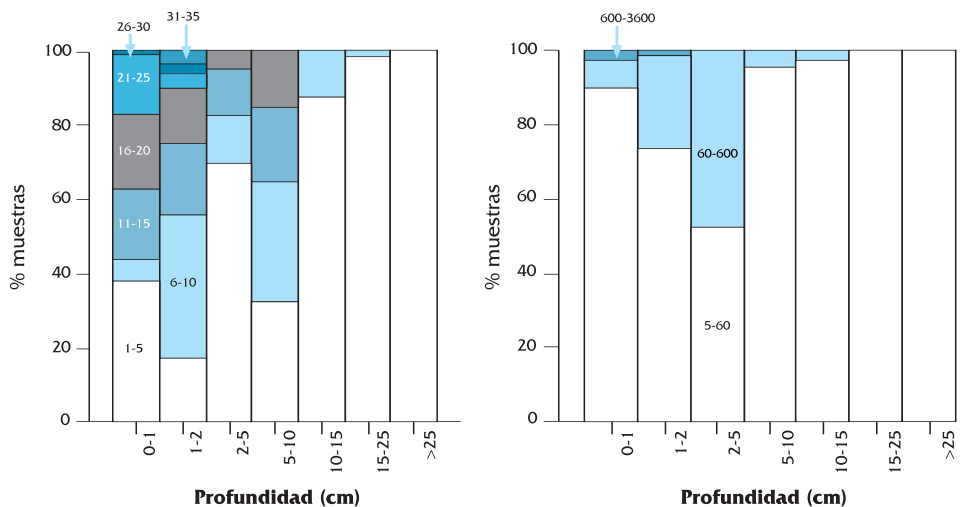


Figura 16. Distribución del grado (izquierda, porcentaje de alcohol) y persistencia (derecha, WDPT en s) de la repelencia potencial al agua de los suelos de Los Cabezudos.

LA HIDROFOBIA EN LOS SUELOS ARENOSOS DEL PARQUE NATURAL DE DOÑANA: CARACTERIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN

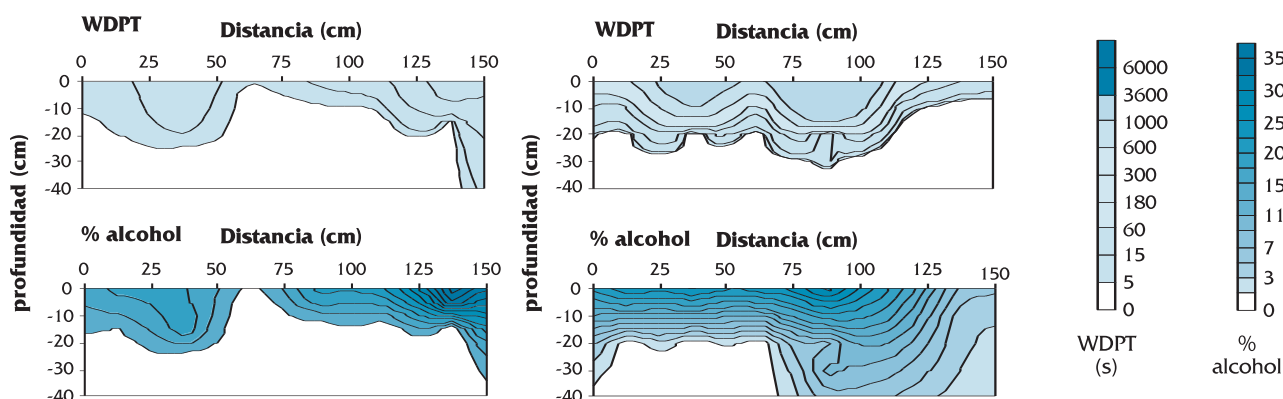


Figura 17. Distribución de la repelencia potencial al agua, WDPT y porcentaje de alcohol, en dos calicatas de El Abalarío, en zona de suelo desnudo.

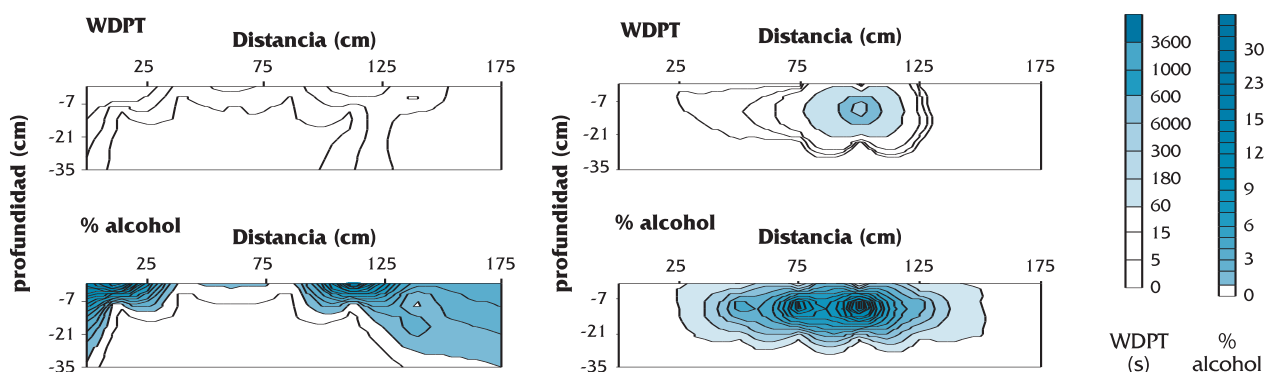


Figura 18. Distribución de la repelencia potencial al agua, WDPT y porcentaje de alcohol, en dos calicatas de Los Cabezudos.

En la zona con suelo desnudo predominan valores del grado de repelencia menores de 6, en porcentaje de alcohol, abarcando más del 50% de las muestras recogidas. También se comprueba como más de un 20% de las muestras presentan un grado de repelencia superior a 30. En general, el grado de repelencia medio es menor que en la zona con pinos. En cuanto a la persistencia de la repelencia al agua, los resultados son semejantes a los de las áreas cubiertas, mostrándose un 54% de las muestras como ligeramente repelentes y un 10% con los niveles más extremos, aunque dentro de los primeros el intervalo mayoritario es el comprendido entre 5-15 s, por 15-60 s en las zonas de pinar, y en los extremadamente repelentes, la mayoría de las muestras se concentran en el intervalo 3600-6000 s, mientras que en las áreas con pinos se encuentran con valores mayores a 6000 s.

Considerando diferentes profundidades en el suelo (figura 15), los valores más altos del porcentaje de alcohol se detectaron en los horizontes situados a menos de 17.5 cm de profundidad, fundamentalmente en los primeros 5 cm. La tendencia es parecida a la obtenida en los lugares con cubierta de pinos.

También es semejante la distribución de las muestras en profundidad según la persistencia, apareciendo las severas y extremadamente repelentes sólo hasta unos 15 cm. Los suelos desnudos muestran unos niveles importantes de hidrofobia, debido a la influencia de las zonas de pinar que los rodean y de la historia pasada del suelo. En estas áreas existían unas cubiertas vegetales, principalmente pinos, que si bien han desaparecido en la actualidad, han permitido que en los suelos se mantengan los compuestos orgánicos que envuelven a los granos de arena e inducen repelencia al agua.

Los suelos arenosos bajo eucaliptar, tienen unos porcentajes de suelo repelente mucho menor que los de las otras zonas experimentales (figuras 13 y 16). Un 33% de las muestras repelentes tenían un grado menor de 3, en porcentaje de alcohol, si bien en un 25% se detectó un grado superior a 15. Con respecto a la persistencia, un 37% de las muestras son fuertemente repelentes, en el intervalo 60-180 s. Son escasas las severamente repelentes, menos de un 4%, no habiéndose medido repelencia extrema. Por profundidades, las muestras más extremas se encuentran a menos de 10 cm, tanto en función del grado como de la persistencia de la hi-

drofobia. Aunque en esta zona se han medido menores niveles de repelencia al agua, éstos son suficientes para la generación de inestabilidades en los frentes de humedecimiento.

Se han representado los parámetros característicos de la repelencia al agua del suelo para cada una de las calicatas realizadas, obteniéndose secciones transversales como las representadas en las figuras 17 y 18. Las diferentes secciones verticales realizadas en la zona de El Abalarío bajo pinar, mostraron como la repelencia al agua es un fenómeno superficial, concentrándose los casos más extremos en los primeros centímetros del suelo, como ya se indicó con anterioridad. La disposición de los horizontes repelentes muestran una cierta estratificación, disminuyendo con la profundidad hasta desaparecer completamente. También son visibles las presencias de regiones aisladas del suelo donde la hidrofobia se muestra más intensa que en las áreas contiguas. Esto se puede deber a la concentración de materia orgánica en esos lugares, por la descomposición del material vegetal procedente de los pinos o por la acción de las raíces activas que producen diversos compuestos orgánicos, los cuales se asocian con el suelo y generan bolsas aisladas de repelencia al agua. Se destaca cómo, en todas las calicatas excavadas en esta zona, se encontró repelencia potencial al agua, lo cual indica la amplia extensión del fenómeno en los suelos arenosos con pinos

Las mismas consideraciones antes indicadas pueden ser válidas para la campaña de muestreo llevada a cabo en los suelos desnudos de El Abalarío. Sin embargo, en éstos se observa cómo en algunas de las calicatas se encuentran amplias zonas con ausencia de repelencia al agua, es decir, suelos humedecibles con normalidad cubriendo una amplia parte de la zona excavada, apareciendo la repelencia como unas regiones aisladas en superficie. También se encuentra hidrofobia en bolsas de suelo aisladas en profundidad, producto de la acumulación subsuperficial de la materia orgánica, probablemente procedente de los restos de los árboles existentes en el pasado. Incluso en una de las calicatas, excavada el 8 de mayo de 1996, no se detectó repelencia potencial alguna.

En las secciones transversales de las calicatas excavadas en las regiones con predominio de eucaliptos, se encuentran unos patrones muy distintos a los expuestos con anterioridad, en cuanto a la distribución de las zonas potencialmente repelentes al agua. Con frecuencia se detectan lentes aisladas de suelo repelente, con una distribución un tanto irre-

gular a través del perfil del suelo. En algún caso también se encuentra una degradación de los niveles de la repelencia con la profundidad, mostrando una cierta estratificación, aunque ésta no es la disposición más habitual. Además, es posible la observación de amplias zonas con ausencia total de hidrofobia, como en la calicata excavada el 16 de diciembre de 1997.

CONCLUSIONES

Habiéndose detectado la existencia de hidrofobia en los suelos arenosos del Parque Natural de Doñana, se ha caracterizado su ocurrencia y distribución. Se ha observado cómo la repelencia al agua se origina debido a la presencia de unos parches de origen orgánico sobre los granos de arena, siendo más intenso este recubrimiento cuanto más hidrófobo es el suelo. Asimismo, se constata como en las muestras más repelentes existe una mayor cantidad de partículas finas y diversas sustancias amorfas intersticiales.

Desde un punto de vista botánico, se ha comprobado como existe una relación entre la especie vegetal dominante y la hidrofobia del suelo. Así, en la zona cubierta con pinos hay una mayor proporción de suelo repelente al agua, con los niveles más altos de grado y persistencia de la hidrofobia. También en la región de suelo desnudo se han medido importantes niveles de repelencia, ocupando una superficie del suelo menos extensa que en los lugares con pinos. Esto se debe a la influencia del área contigua de pinar y a la probable existencia de una cubierta vegetal en el pasado. En la zona de Los Cabezudos, con predominio de eucaliptos, la hidrofobia muestra una distribución muy desigual y con niveles del grado y persistencia menores que en los casos anteriores. Aunque existen diferencias entre las zonas experimentales, la repelencia al agua se manifiesta en los horizontes más superficiales del suelo, habiéndose recogido muestras hidrófobas hasta una profundidad máxima de unos 45 cm. Además se ha demostrado cómo éste es un fenómeno bastante distribuido. Debido a ello, los suelos arenosos del Parque Natural de Doñana son potencialmente aptos para la generación de flujos preferenciales, la formación de frentes de humedecimiento irregulares e incompletos y, en definitiva, una importante alteración de la hidrología superficial.

La resistencia al humedecimiento de un suelo repelente disminuye con el tiempo que el agua está en contacto con él. Así las medidas de la hidrofobia

en condiciones de campo exclusivamente, pueden ser inadecuadas, obteniéndose una información más completa cuando se realicen comparaciones entre medidas tomadas en distintos momentos. Por ello se determinó la repelencia real al agua, analizándose los porcentajes de suelo que eran efectivamente repelentes en cada una de las calicatas excavadas en diferentes condiciones ambientales. En los periodos con ambiente húmedo no se detectaron zonas extensas del suelo repelentes al agua, quedando la hidrofobia aislada en lentes o bolsas de suelo, cuando todavía podía manifestarse. Sin embargo, con la llegada del estío, una gran parte del área de los perfiles con repelencia potencial eran también, en ese momento, actual o realmente repelentes.

La variabilidad temporal de la repelencia al agua en estos suelos se debe, tanto a las características repelentes, con carácter potencial, como a las condiciones ambientales.

La repelencia potencial al agua de un suelo es un parámetro independiente del tiempo que varía de unos lugares a otros en función del tipo de vegetación que predomina localmente. La importancia en la determinación de los valores potenciales radica en que éstos pueden influir, de forma fundamental, en la distribución espacial del agua en el perfil del suelo, informándonos acerca de la ocurrencia, profundidad, distribución, variabilidad, grado y persistencia de la hidrofobia, pudiéndose realizar comparaciones entre suelos con diferentes cubiertas vegetales, como se hizo en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

En los trabajos de campo, ha sido de gran ayuda la colaboración de la Dra. Rafaela Ordoñez y de Juan de Haro, ambos pertenecientes al CIFA de Córdoba.

También se reconoce la amabilidad y disposición del Dr. Tomás Moyano, director del Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad de Córdoba, para la utilización del microscopio de barrido electrónico y la realización y tratamiento de las imágenes.

Se agradece la financiación de la CICYT a través de los proyectos AMB 92-0636 y AMB 95-0372. También se agradece al Parque Natural de Doñana su apoyo y la ayuda de la guardería, al Parque Nacional de Doñana, y en especial a D. Carlos Urdiales el suministro de datos meteorológicos.

REFERENCIAS

- BACHMANN, J., R. HORTON, R.R. VAN DER PLOEG y S. WOCHÉ, (2000), Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:564-567
- BOOKER, F.A., W.E. DIETRICH, y L.M. COLLINS, (1993), Runoff and erosion after the Oakland firestorm, *Cal. Geol.* 46:159-173.
- CAPRIEL, P., (1997), Hydrophobicity of organic matter in arable soils: influence of management, *Eur. J. Soil Sci.* 48:457-462.
- CARRILLO, M.L.K., J. LETEY y S.R. YATES, (1999), Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:433-436
- CHANG, K.Y., (1992), Development of seasonal water repellency under direct drilling, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:326-329.
- DEKKER, L.W., (1998), Moisture variability resulting from water repellency in dutch soils, Tesis Doctoral, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- DEKKER, L.W., y JUNGERIUS, P.D (1990) Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands. *Catena Suppl.* 18:173-183.
- DEKKER, L.W., y RITSEMA, C.J (1994) How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.* 30:2507-2517.
- DEKKER, L.W., C.J. RITSEMA, K. OOSTINDIE, y O.H. BOERSMA, (1998), Effect of drying temperature on the severity of soil water repellency, *Soil Sci.* 163:780-796.
- DÍAZ, M (1953) Primera revisión del proyecto de ordenación de los montes de la zona forestal de Almonte (Huelva). Patrimonio Forestal del Estado.
- DOERR, S.H., R.A. SHAKESBY y R.P.D. WALSH, (1998), Spatial variability of soil Hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal, *Soil Sci* 163:313-324.
- EMERSON, W.W., (1993), Comments on "Development of seasonal water repellence under direct drilling", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:877.
- GARCÍA, P., y SOUSA, A (1997) Vegetation changes in Abalario (Parque Natural Entorno de Doñana). Proceedings VIII Optima Meeting.
- HARPER, R.J. y R.J. GILKES, (1994), Soil attributes related to water repellency and the utility of soil survey for predicting its occurrence, *Aust. J. Soil Res.* 32:1109-1124.
- HUNTER, R.J., (1986), Foundations of colloid science, Vol. 1, Oxford University Press, Oxford.
- DE JONGE, L.W., O.H. JACOBSEN, y P. MOLDRUP, (1999), Soil water repellency: effects of water content, temperature, and particle size, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:437-442.
- JAMISON, V.C (1942) The slow reversible drying of sandy surface soils beneath citrus trees in Central Florida. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 7:36-41.
- LETEY, J., OSBORN, J.F., y VALORAS, N (1975) Soil water re-

- pellency and the use of nonionic surfactants. Contribution No. 154, Universidad de California, Davis.
- McGHIE, D.A., y POSNER, A.M (1980) Water repellence of a heavy texture Australian soil. *Aust. J. Soil Res.* 18:309-323.
- McKISSOCK, I., R.J. GILKES, R.J. HARPER y D.J. CARTER, (1998), Relationships of water repellency to soil properties for different spatial scales of study, *Aust. J. Soil Res.* 36:495-507.
- MORAL, F.J (1999) Hidrología de los suelos arenosos del Parque Natural del Entorno de Doñana. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba, España.
- OJEDA, J.F (1987) Organización del territorio en Doñana y su Entorno próximo (Almonte). Siglos XVIII-XX. I.C.O.N.A. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). Madrid.
- OSBORN, J.F., R.E. PELISHEK, J.S. KRAMMES, y J. LETEY, (1964), Soil wettability as a factor in erodibility, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28:294-295.
- RICHARDSON, J.L (1984) Field observation and measurement of water repellency for soil surveyors. *Soil Survey Horiz.* 25(2):32-36.
- RITSEMA, C.J., (1998), Flow and transport in water repellent sandy soils, Tesis Doctoral, Wageningen Agricultural University. Wageningen, Holanda.
- SALVANY, J.M., y CUSTODIO, E (1995) Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. *Rev. Soc. Geol. España.* 8:(1-2):21-31.
- SAVAGE, S.M., (1974), Mechanism of fire-induced water repellency in soil, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38:652-657.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (1975) Soil taxonomy. USDA Agr. hbk. no. 436. Washington.
- TERRY, J.P., (1990), Land management, fire and erosion in Mediterranean and associated forest environments- a review. Aveiro-Swansea Erosion Research Bull. n. 2
- TUCKER, K.A., K.J. KARNOK, D.E. RADCLIFFE, C. LANDRY JR., R.W. RONCADORI, y K.H. TAN, (1990), Localized dry spots as caused by hydrophobic sands on bentgrass greens, *Agron. J.* 82:549-555. Wallis, M.G. y D.J. Horne, (1992), Soil water repellency, *Adv. Soil Sci.* 20:91-146.
- WHITE, R.E., (1979), Introduction to the principles and practice of soil science, Blackwell, Oxford.