

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CAMBIOS EN PROPIEDADES HÍDRICAS DEL SUELO POR
SUSTITUCIÓN DE PASTURAS POR COBERTURA FORESTAL**

por

Maximiliano GOZÁLEZ SOSA

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias del Suelo

Montevideo
URUGUAY
diciembre 2019

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. PhD Fernando García Préchac, Ing. Agr. PhD Jorge Hernández e Ing. Agr. PhD José Terra, el 19 de Diciembre de 2019. Autor: Ing. Agr. Maximiliano González Sosa. Director: Ing. Agr. PhD Mario Pérez Bidegain.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y abuelos, sin quienes esto no habría sido posible.

A los compañeros del Grupo Disciplinario de Suelos del Dpto. de Suelos y Aguas de Facultad de Agronomía, que durante estos años han sido más que compañeros de trabajo.

A Mario Pérez por la confianza y por estar siempre para discutir.

A la Facultad de Agronomía por las oportunidades de trabajo y formación que me ha brindado.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación y a la Comisión Académica de Posgrados de la Udelar por las becas que apoyaron este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN.....	VII
SUMMARY	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. MARCO TEÓRICO	2
1.1.1. <u>Principios físico-químicos</u>	3
1.1.1.1. Hidrofobicidad y ángulo de contacto	5
1.1.1.2. Persistencia y severidad	8
1.1.2. <u>Caracterización de la hidrofobicidad</u>	9
1.1.2.1. Persistencia y WDPT test.....	10
1.1.2.2. Severidad y MED test.....	12
1.1.3. <u>Origen de la hidrofobicidad</u>	14
1.1.3.1. Hidrofobicidad y materia orgánica del suelo	14
1.1.3.2. Compuestos responsables de la hidrofobicidad..	16
1.1.3.3. Conceptualización de la hidrofobicidad en base a química de superficies	18
1.1.3.4. Hidrofobicidad y densidad de empaque de los compuestos generadores.....	20
1.1.3.5. Origen de las sustancias hidrofóbicas	21
1.1.4. <u>Relación de la hidrofobicidad con otras propiedades del suelo</u>	29
1.1.4.1. Hidrofobicidad y textura del suelo	29

1.1.4.2.	Hidrofobicidad y humedad del suelo	30
1.1.4.3.	Hidrofobicidad y pH.....	32
1.1.5.	<u>Variabilidad de la hidrofobicidad</u>	33
1.1.6.	<u>Sistema de laboreo e hidrofobicidad</u>	35
1.1.7.	<u>Consecuencias de la hidrofobicidad</u>	36
2.	<u>CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES HÍDRICAS DEL SUELO POR SUSTITUCIÓN DE PASTURAS POR COBERTURA FORESTAL</u>	39
2.1.	RESUMEN	39
2.2.	ABSTRACT	40
2.3.	INTRODUCCIÓN.....	41
2.4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
2.4.1.	<u>Determinación de densidad aparente del suelo e hidrofobicidad a distintos niveles de succión</u>	43
2.4.2.	<u>Determinación del contenido de agua a cada nivel de succión y contenido de C orgánico</u>	44
2.4.3.	<u>Análisis estadístico</u>	45
2.4.3.1.	Efecto del cambio de uso del suelo de pasturas nativas a forestación sobre el desarrollo de hidrofobicidad.....	45
2.4.3.2.	Efecto de la especie forestal y densidad de plantación sobre la hidrofobicidad del suelo a cada nivel de succión.....	45
2.4.3.3.	Efecto de la succión sobre la hidrofobicidad.....	46
2.4.3.4.	Efecto de la especie forestal y densidad de plantación sobre la tasa de aumento de la hidrofobicidad del suelo ante cambios en el nivel de succión	46
2.4.3.5.	Relación entre hidrofobicidad y contenido de carbono orgánico e hidrofobicidad y retención de agua del suelo	46
2.5.	RESULTADOS.....	47

2.5.1.	<u>Efecto del cambio en el uso del suelo sobre la hidrofobicidad a diferentes niveles de succión</u>	47
2.5.2.	<u>Efecto de la especie forestal y densidad de plantación sobre la hidrofobicidad del suelo a cada nivel de succión</u>	50
2.5.3.	<u>Efecto de la succión sobre la hidrofobicidad</u>	53
2.5.4.	<u>Efecto de la especie forestal sobre la tasa de aumento de la hidrofobicidad del suelo</u>	53
2.5.5.	<u>Relación entre la hidrofobicidad y contenido de C orgánico</u>	54
2.5.6.	<u>Relación entre capacidad de retención de agua del suelo e hidrofobicidad</u>	54
2.6.	DISCUSIÓN	55
2.7.	CONCLUSIONES	58
2.8.	REFERENCIAS	59
3.	<u>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES</u>	65
3.1.	COMENTARIOS GENERALES	70
4.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	71

RESUMEN

El rubro forestal ha tenido un crecimiento permanente en las últimas décadas en Uruguay. Existen evidencias científicas que indican que suelos bajo usos forestales presentan menor capacidad de retención de agua que suelos bajo usos pastoriles. Este trabajo plantea la hipótesis del desarrollo de hidrofobicidad, causada por algunas sustancias orgánicas que se depositan sobre y entre las partículas del suelo, y serían resultado de la descomposición de restos vegetales derivados de las plantaciones forestales. El objetivo general de este trabajo fue determinar el efecto de la sustitución de pasturas por plantaciones forestales sobre la persistencia de la hidrofobicidad y la capacidad de retención de agua del suelo y su relación con cambios en el contenido de carbono orgánico del mismo. Se plantearon los siguientes objetivos específicos: determinar si existe un impacto diferencial en estas propiedades del tipo de cobertura forestal (*Pinus taeda* o *Eucalyptus grandis*), y de la densidad de plantación, y determinar si existe una relación entre la hidrofobicidad desarrollada bajo cada uso del suelo y el contenido de humedad que tenía el mismo en el momento de la medición. La hidrofobicidad de la superficie del suelo mineral bajo uso forestal fue mayor que bajo campo natural, existiendo diferencia a todos los niveles de succión evaluados. A su vez, la hidrofobicidad desarrollada bajo *Eucalyptus grandis* fue mayor que bajo *Pinus taeda*. En todos los casos anteriores se observó un aumento de la hidrofobicidad con el incremento de la energía de retención del agua, el cual fue mayor en los usos que generan un nivel de repelencia al agua más elevado. La capacidad de retención de agua a cada nivel de succión en suelos bajo uso forestal fue menor que en suelos bajo cobertura de campo natural, existiendo una correlación negativa entre la capacidad de retención de agua y la hidrofobicidad del suelo. Los resultados sugieren que el cambio del uso del suelo de pastoril a forestal determina un aumento de la hidrofobicidad en la superficie, el cual es mayor en coberturas de *Eucalyptus grandis*, teniendo un efecto significativo sobre su capacidad de retención de agua. La magnitud de esta propiedad depende, a su vez, del contenido de humedad del suelo al cual se realiza la medición. Futuros estudios deberán considerar si este comportamiento se repite en profundidad.

Palabras clave: repelencia al agua, *Eucalyptus*, *Pinus*, campo natural, forestación

Changes in the Soil Water Properties Associated with Land Use Migration from Pastures to Forests

SUMMARY

The forestry sector has had a permanent growth in the last decades in Uruguay. Scientific evidence indicates that soils under forest cover have less water holding capacity than soils under native pastures. A possible hypothesis is the development of hydrophobicity, which is caused by some organic substances that are deposited on and between the soil particles, and would be the result of plant debris decomposition derived from forest plantations. The general objective of this work was to determine the effect of land use change from pastures to forest plantations on hydrophobicity persistence and soil water holding capacity, and the relationship of these changes with variations on the soil organic carbon content. The specific objectives were: to determine the effect of the forest species (*Pinus taeda* or *Eucalyptus grandis*) and planting density on these properties, and to determine if there is a relationship between the hydrophobicity developed under each land use and soil moisture content. The hydrophobicity of the mineral soil surface under forest cover was greater than under the native pasture, being different at all the suction levels in evaluation. Moreover, the hydrophobicity developed under *Eucalyptus grandis* was higher than under *Pinus taeda*. In all the previous cases, an increase in soil water repellency with the increase in water retention energy was observed, which was higher in the land uses that generate a higher level of water repellency. The water holding capacity at each suction level in soils under forest cover was lower than in soils under native pastures, with a negative correlation between water holding capacity and soil hydrophobicity. The results suggest that the change in land use from native pastures to forest cover determines an increase in the surface hydrophobicity, which is higher under *Eucalyptus grandis* cover, and determines a decrease in soil water holding capacity. Furthermore, the magnitude of this property depends on the soil moisture content at the moment it was measured. Future studies should consider whether this behavior is repeated in depth.

Keywords: soil water repellency, *Eucalyptus*, *Pinus*, native pastures, forestry

1. INTRODUCCIÓN

El rubro forestal ha tenido un crecimiento permanente en las últimas décadas en Uruguay. Hasta el año 1987, cuando se promulgó de la Ley Forestal N° 15.939 (Uruguay, 1988), la superficie de bosques plantados con fines industriales era de 46.000 hectáreas, superando actualmente 1,2 millones de hectáreas. Los principales géneros plantados son *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.* existiendo, a su vez, aproximadamente 800.000 hectáreas de bosque nativo (SPF, 2019).

El desarrollo forestal en Uruguay es particular en relación a otras zonas del mundo debido a que ocurre en latitudes templadas, sustituyendo áreas de vegetación natural de pasturas en lugar de realizar manejo de formaciones forestales nativas. Esta particularidad genera cierto grado de impredecibilidad en el impacto que estos sistemas productivos pueden tener sobre el ambiente, particularmente sobre el suelo y la dinámica del agua en el mismo. Existen evidencias científicas que indican que suelos bajo usos forestales presentan menor capacidad de retención de agua que suelos bajo usos pastoriles (Rodríguez Jelós, 2008), particularmente debido a cambios en algunas de sus propiedades químicas que repercutirían en un aumento de su hidrofobicidad, entendida como la pérdida de afinidad del suelo por el agua, resistiendo el proceso de humedecimiento por períodos variables de tiempo (Doerr y Thomas, 2000). Este comportamiento estaría causado por algunas sustancias orgánicas de difícil identificación, que se depositan sobre y entre las partículas del suelo, y serían resultado de la descomposición de restos vegetales derivados de las plantaciones forestales (Doerr et al., 2000).

La hidrofobicidad o repelencia al agua es un fenómeno ampliamente distribuido en el mundo (Ritsema y Dekker, 2003), cuya ocurrencia ha sido determinada en climas muy diversos y en suelos bajo usos muy variados (Doerr et al. 2000, Jaramillo et al. 2000, Rodríguez-Alleres et al. 2007, Vogelmann et al. 2010, Butzen et al. 2015) . Tiene importancia tanto por sus implicancias productivas como ambientales, destacándose una menor cantidad de agua disponible en el suelo para el crecimiento vegetal por la disminución de la tasa de infiltración (Cerdà y Doerr, 2007), mayor escurrimiento e incremento de la erodabilidad del suelo (Leighton-

Boyce et al. 2007, Butzen et al. 2015), generación de frentes de humedecimiento inestables y flujos preferenciales (Ritsema et al. 1998, Dekker y Ritsema 2000, Ritsema y Dekker 2000), como consecuencia, lixiviado potencialmente acelerado de contaminantes (Ritsema et al. 1998, Ritsema y Dekker 2000).

El importante crecimiento en superficie que ha protagonizado el rubro forestal en Uruguay, las particularidades de su desarrollo en relación a otras regiones del mundo, así como las interrogantes vinculadas a cambios en las propiedades de los suelos que inciden sobre la dinámica del agua, determinan la necesidad de conocer cuáles son estos impactos sobre el recurso suelo, haciendo énfasis en las implicancias que dichos potenciales cambios tienen sobre la actividad productiva.

1.1.MARCO TEÓRICO

La hidrofobicidad se define como la disminución de la afinidad del suelo por el agua, lo que reduce su capacidad para humedecerse por períodos variables de tiempo (Doerr et al. 2000, Olorunfemi et al. 2014). Por ejemplo, las gotas de lluvia pueden penetrar en un suelo no hidrofóbico en menos de un segundo, mientras que este proceso puede prolongarse por varias horas en uno hidrofóbico (King, 1981). En la práctica, no existe una superficie que sea totalmente hidrofóbica, por lo que la repelencia al agua debe considerarse en términos de baja hidrofilicidad (Tschapek, 1984).

Esta propiedad del suelo se manifiesta en climas muy diversos, desde tropicales húmedos (Vogelmann et al. 2010, Cambronerero et al. 2011), fríos y húmedos del norte de Europa (Dlapa et al. 2008, Wahl 2008), cálidos y secos de Australia central (Thwaites et al., 2006) a mediterráneos del sur de Europa (Mataix-Solera et al. 2007, Rodríguez-Alleres et al. 2007, Keizer et al. 2007). A su vez, se reporta la ocurrencia del fenómeno en una gran variedad de tipos de suelo, desde ácidos a alcalinos (Zavala et al., 2009) y de arenosos a arcillosos (Dekker y Ritsema 1994, 1996).

El fenómeno de hidrofobicidad aparece frecuentemente reportado en suelos bajo plantaciones forestales. Varios autores (Doerr et al. 2000, Verheijen y Cammeraat 2007, Mataix-Solera et al. 2007, Rodríguez-Alleres et al. 2007) lo asocian con la presencia de algunas especies perennes, particularmente aquellas con una considerable concentración de resinas, ceras o aceites aromáticos en algunos de sus órganos, como es el caso de especies de los géneros *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.*, tanto en sus áreas naturales de origen como en zonas donde se comportan como exóticas (Doerr et al., 2000). Sin embargo, existen antecedentes que plantean la posibilidad de ocurrencia del fenómeno en suelos bajo cobertura de pastizales naturales o pasturas implantadas (Dekker y Ritsema, 1994).

1.1.1. Principios físico-químicos

En un suelo hidrofóbico existe una reducción de la atracción de las superficies de las partículas del suelo y los agregados que forman por el agua (Tschapek, 1984). El grado de atracción o repelencia de una superficie como la del suelo por el agua ocurre como resultado de un balance entre fuerzas de adhesión (atracción de las moléculas de agua por la superficie de los sólidos del suelo) y de cohesión (atracción de las moléculas de agua entre sí). Según Roy y McGill (2002) la hidrofobicidad es función de la química de la superficie del suelo, particularmente de la energía libre de la interfase sólido-gas y la relación de esta variable con la tensión superficial de la solución acuosa dispuesta sobre su superficie. Suelos con una baja energía libre de la interfase sólido-gas se comportarán como más hidrofóbicos que aquellos que tengan una elevada energía libre.

La base físico-química de este fenómeno radica en las características de la molécula de agua, que la hacen particular en relación a moléculas similares como el H_2S . La molécula de agua tiene un bajo peso molecular y los elementos que la componen, en sus formas moleculares H_2 y O_2 , se comportan como gases en condiciones normales de presión y temperatura. A pesar de esto, el H_2O es un líquido a temperatura ambiente. A esta particularidad se le suman otras, como su punto de

fusión, ebullición, calor específico, calor latente, constante dieléctrica, viscosidad y tensión superficial relativamente elevadas (Hillel, 1998). Estas características indican que existe una elevada cohesión, dada por alguna fuerza que genera que las moléculas de agua tiendan a “mantenerse juntas”.

El átomo de O y los dos átomos de H forman un ángulo de $104,5^\circ$ mediante un enlace covalente, estando los electrones espacialmente más cerca del átomo de O, generando una asimetría eléctrica. Debido a esto, la molécula de agua, a pesar de no tener carga en términos netos, se comporta como un dipolo, con una región con carga parcial negativa (zona del átomo de O), y otra con carga parcial positiva (zona de los átomos de H) (Hillel, 1998). El carácter dipolar del agua genera que se formen enlaces por puente de H entre la zona electropositiva de una y la electronegativa de otra, y es responsable de las características derivadas de la alta cohesión mencionada anteriormente. También es responsable de que el agua sea adsorbida por la superficie de los sólidos e hidrate iones y coloides (Hillel, 1998).

Sin embargo, el propio carácter dipolar del agua, responsable de su atracción a superficies cargadas, genera también fuerzas que se oponen a dicho fenómeno. Según Adamson y Gast (1997), la adsorción es un fenómeno que ocurre por un balance entre diferentes fuerzas de atracción y repulsión que ocurren entre moléculas o iones de fases distintas que se encuentran en la zona de interfase. Dentro del cuerpo de un líquido (por ejemplo una gota) la fuerza neta resultante sobre una molécula será cero, porque sobre ella actúan fuerzas en todas las direcciones y sentidos posibles resultado de los puentes de H formados con las moléculas vecinas. Sin embargo, en el borde de esa gota (la interfase líquido-gas o líquido-sólido) la fuerza resultante no es cero, hay una fuerza neta actuando sobre cada molécula con dirección y sentido hacia el centro de la masa de agua, promoviendo la reducción de la superficie de dicha masa, y haciendo que la misma adquiriera formas esféricas (Adamson y Gast, 1997). Incrementar el área de esta superficie requiere trabajo, que representa la tensión superficial del líquido (Hillel, 1998). Según Tschapek (1984) el agua tiene una tensión superficial a 20°C excepcionalmente alta ($72,75 \times 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$) en

comparación a la mayoría de los líquidos que tienen valores entre 20 y 40×10^{-3} $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$.

Los fenómenos de hidrofobicidad son generados por algunos compuestos que tienen valores de energía libre menores que los del agua, llamándoseles superficies de baja energía (Zisman, 1964), que determinan que primen las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua sobre las de adhesión de las superficies sólidas por el agua. Estas superficies no repelen realmente el agua, sino que la atraen de forma muy débil, no existe una superficie completamente hidrofóbica y por lo tanto la hidrofobicidad debe ser considerada como baja hidrofiliidad (Zisman 1964, Tschapek 1984, Roy y McGill 2002). Según Zisman (1964), la mayoría de los compuestos orgánicos sólidos determinan superficies de baja energía.

1.1.1.1. Hidrofobicidad y ángulo de contacto

Una forma sencilla de detectar la repelencia al agua de una superficie sólida es colocar una gota de agua sobre ella. Si en su contacto inicial dicha gota tiende a adquirir una forma esférica en lugar de esparcirse rápidamente, la superficie es hidrofóbica (Dekker y Ritsema, 1994). Cuanto menor tienda a ser la superficie de contacto entre la gota y el sólido, o cuanto mayor sea la esfericidad de la gota en dicho contacto inicial, mayor será la repelencia mutua entre la superficie sólida y el agua y, por lo tanto, mayor será la hidrofobicidad de la superficie. Este fenómeno físico es analizable cuantitativamente mediante el ángulo de contacto que se forma entre el borde una gota de un líquido y una superficie horizontal, cuando el sistema definido alcanza el equilibrio (Hillel, 1998). En la figura 1 se visualiza el ángulo que forma la gota con el sólido en un punto y se lo identifica como α .

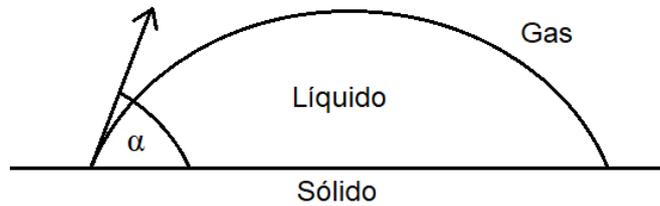


Figura 1: Ángulo de contacto formado entre una gota de un líquido y una superficie sólida horizontal en un sistema en equilibrio

El ángulo de contacto α será más pequeño si aumenta la superficie de contacto entre la gota y el sólido y mayor si dicha superficie se hace más pequeña. Entonces, el ángulo α será progresivamente más pequeño a medida que las fuerzas adhesivas del líquido por el sólido sean más fuertes en términos relativos a las fuerzas de cohesión dentro de la gota. Se considera que las superficies sobre las cuales el agua genera un ángulo de contacto mayor a 90° son hidrofóbicas (Fig. 2), caso en el cual el agua tiende a moverse con facilidad sobre la superficie sin penetrar en los poros (Adamson y Gast 1997, Hillel 1998).

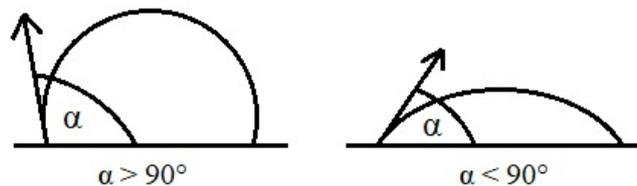


Figura 2: Ángulo de contacto formado sobre una superficie hidrofóbica (izquierda) y sobre una no hidrofóbica (derecha).

Según Zisman (1964) el mayor ángulo de contacto observado en agua fue de 120° , sobre superficies fluorocarbonadas ricas en grupos trifluorometilo ($-\text{CF}_3$), y ligeramente menor (111°) sobre superficies hidrocarbonadas ricas en grupos metilo ($-\text{CH}_3$). Los compuestos fluorocarbonados no existen naturalmente en el suelo, por lo cual el ángulo de contacto de la mayoría de los suelos hidrofóbicos varía entre 90° y 111° (Roy y McGill, 2002).

El mismo fenómeno físico puede ser descrito en términos de las fuerzas que actúan en el punto límite de las tres fases (Fig. 3). En dicho punto hay tres interfases (líquido-sólido, sólido-gas y gas-líquido). Cada una de dichas interfaces está sometida a una tensión superficial, una propiedad que se define como una fuerza por unidad de distancia o energía por unidad de superficie. Para que una gota de un líquido permanezca en equilibrio con una superficie de un sólido y una fase gaseosa, las fuerzas que actúan en ese punto sobre cada una de las interfases (tensiones superficiales) deben sumar cero (Hillel, 1998).

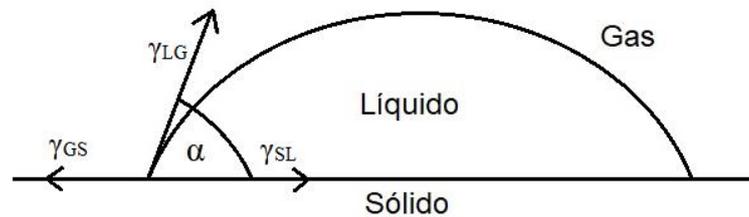


Figura 3: Tensiones superficiales de cada una de las interfases correspondientes a un sistema sólido-líquido-gas en equilibrio

El estado de equilibrio anterior es descrito por la Ecuación de Young (1), que relaciona las tensiones superficiales de cada una de las interfases con el ángulo de contacto α .

$$(1) \gamma_{GS} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cdot \cos\alpha$$

$$\cos\alpha = (\gamma_{GS} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG}$$

La Ecuación de Young aplica a condiciones de equilibrio, lo que constituye al ángulo de contacto como una propiedad termodinámica (Roy y McGill, 2002). De ella se desprende que reducir la tensión superficial líquido-gas o sólido-líquido (por la adición de etanol, por ejemplo) genera un aumento del coseno de α , y una consecuente disminución del ángulo de contacto. Esto significa que aumenta el mojado de la superficie del sólido.

El ángulo de contacto es la expresión física directa del grado en el cual una superficie repele al agua, y su determinación es una de las formas de caracterización

del fenómeno de hidrofobicidad (Zisman, 1964). Según Roy y McGill (2002) a través de su medición se obtiene un indicador de la energía libre de la interfase sólido-gas del sistema analizado. Un ángulo de contacto es específico de una determinada combinación de las tres fases involucradas en el sistema, pero cuando los dos fluidos se mantienen constantes (agua y aire) o se consideran constantes, pasa a depender únicamente de las características del sólido.

1.1.1.2. Persistencia y severidad

A pesar de que el ángulo de contacto de equilibrio es la expresión física medible de la hidrofobicidad, por ser el mejor indicador de la energía libre de la interfase sólido/gas, no es directamente aplicable al suelo porque el ángulo de contacto tiende a disminuir por debajo de 90° antes de que el equilibrio se alcance (Richardson y Hole, 1978), debido a cambios en las características físico-químicas iniciales que determinan la hidrofobicidad. Según Dann (1970), incluso sistemas simples en los cuales se coloca una gota de un líquido polar sobre una superficie de vidrio, pueden necesitarse hasta 10 minutos para alcanzar el equilibrio.

Según Doerr et al. (2000) la magnitud de la hidrofobicidad disminuye a medida que aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la superficie del suelo y, por lo tanto, el ángulo de contacto se hará progresivamente menor antes de que se alcance una situación de equilibrio que sea función de la hidrofobicidad inicial. A su vez, el suelo no es un material homogéneo, tanto desde un punto de vista químico como físico, y como consecuencia, el ángulo de contacto no se comporta igual que como lo haría en una superficie homogénea. Algunas de las características que inciden sobre el ángulo de contacto son: la rugosidad de la superficie, que genera la presencia de aire atrapado entre la base de la gota de agua y la superficie del suelo, y la heterogeneidad de la composición química de este último (Wessel, 1988). Otro elemento a destacar es el dinamismo de las características químicas del suelo, generándose cambios en el ángulo de contacto tanto por un aumento de la tensión superficial del sólido como por la disminución de la tensión superficial del líquido

(Watson y Letey, 1970), siendo ambos consecuencia de variaciones en las características químicas de las respectivas fases con consecuencias en el comportamiento de su interfase. Para evitar estos inconvenientes relacionados a la imposibilidad de alcanzar situaciones de equilibrio estático para medir el ángulo de contacto, es que se llega a los conceptos de severidad y persistencia.

La persistencia refiere al tiempo que tarda una gota de agua en penetrar completamente en una muestra de suelo. Una gota de agua penetrará en un medio poroso únicamente cuando el ángulo de contacto sea menor a 90° . En el caso de los suelos hidrofóbicos, el ángulo de contacto inicial es mayor a 90° , pero existe un período de tiempo durante el cual dicho ángulo disminuye hasta un valor menor a 90° y la gota finalmente infiltra (Watson y Letey 1970, Wessel 1988, Doerr et al. 2000, Roy y McGill 2002).

La severidad es el grado en el cual el suelo resiste el mojado durante un corto período de contacto entre el líquido y el sólido (Roy y McGill, 2002). Esta propiedad puede ser estimada midiendo el ángulo de contacto inicial de avance, que es el ángulo que se forma el instante inicial de contacto entre la gota de agua y la superficie del suelo. El ángulo cambia con el tiempo de contacto entre el líquido y el sólido, por lo que no se trata de un verdadero ángulo de contacto de equilibrio pero es un buen indicador de la tensión superficial inicial del sólido (Wessel 1988, Doerr 1998, Roy y McGill 2002).

1.1.2. Caracterización de la hidrofobicidad

Como se introdujo en la sección anterior, la evaluación de la repelencia al agua de los suelos puede tener dos abordajes. Por un lado, puede ser medida a través del ángulo de contacto inicial entre la gota de agua y la superficie del suelo, o lo que es similar, estimar la energía libre de la interfase superficie del suelo-gas. Por otro lado, puede ser medida a través del tiempo que demora una gota en infiltrar en el suelo. En el primer caso se describe la severidad del fenómeno y en el segundo su persistencia.

Existen diferentes metodologías para medir la hidrofobicidad de los suelos, las dos más utilizadas son *Water drop penetration time* (WDPT) para persistencia y *Molarity of ethanol droplet test* (MED) para severidad (Watson y Letey 1970, Doerr 1998).

1.1.2.1. Persistencia y WDPT test

Si el carácter hidrofóbico del suelo no fuera función del tiempo de contacto entre la superficie del suelo y el agua, una gota colocada sobre un suelo no hidrofóbico infiltraría de forma inmediata, mientras que una gota colocada sobre uno repelente al agua permanecería en su superficie hasta que se evaporara completamente (Tschapek, 1984). Cuando se coloca una gota de agua sobre la superficie del suelo, la misma terminará avanzando de manera espontánea dentro de la porosidad del suelo. El tiempo transcurrido hasta que esto ocurra determina la persistencia del fenómeno de hidrofobicidad, y es la base conceptual de la técnica WDPT (*Water drop penetration time*) (Wessel, 1988).

Esta técnica consiste en colocar una gota de agua en la superficie de la muestra de suelo y determinar el tiempo que la misma demora en penetrar al suelo completamente (Doerr, 1998). Normalmente esta técnica se lleva a cabo sobre muestras perturbadas (Wallis et al., 1993), por lo que las muestras son tamizadas, colocadas sobre un recipiente y su superficie es emparejada. Posteriormente se colocan gotas idénticas de agua desmineralizada en la superficie de la muestra utilizando un gotero (Doerr, 1998). La cantidad de gotas colocadas por muestra de suelo es variable entre trabajos, oscilando entre 3 y 6, el resultado de WDPT para la muestra en cuestión se desprende de la media del tiempo de permanencia de cada una de las gotas sobre la superficie (Doerr et al. 1996, Doerr 1998).

Con esta metodología se separan suelos que son clasificados como hidrofóbicos de aquellos que no lo son, determinándose el tiempo en el cual cambia el ángulo de contacto suelo-agua de su valor original (superior a 90° en un suelo hidrofóbico) a un valor próximo a 90° , necesario para que ocurra el esparcimiento de

la gota sobre la superficie y su infiltración (Letey et al., 2000). Otra forma de visualizar lo anterior es que esta técnica mide el tiempo durante el cual la tensión superficial del suelo se mantiene por debajo de la tensión superficial del agua ($72,75 \times 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$) (Doerr, 1998). Por lo tanto, es una medida de la estabilidad de la hidrofobicidad y no necesariamente de la magnitud del ángulo de contacto.

Sin embargo, Wessel (1988) plantea que existe una fuerte relación lineal negativa entre el logaritmo de WDPT (s) y el coseno del ángulo de contacto efectivo inicial (α), lo cual indica una fuerte correlación entre la persistencia y la severidad del fenómeno de hidrofobicidad. Aquellos suelos fuertemente hidrofóbicos demoran más tiempo en perder dicho carácter por contacto superficie del suelo-agua que los de baja repelencia.

El valor de la variable WDPT en un suelo puede variar desde pocos segundos a varias horas, existiendo numerosas clasificaciones en niveles de repelencia, basados en esta característica de persistencia del fenómeno (Doerr, 1998). Es una metodología muy útil para describir el fenómeno debido a su rapidez de aplicación, especialmente cuando una gran cantidad de muestras son analizadas, aunque presenta algunas limitantes, como prolongados tiempos de medición cuando las muestras son muy hidrofóbicas, o la influencia de otros factores como la rugosidad de la superficie o la geometría de los poros (Wessel, 1988).

Algunos autores establecen un límite de en 1 segundo en el resultado de esta técnica para definir a un suelo como hidrofóbico (Ma'shum y Farmer, 1985), otros establecen un valor de 5 segundos (Bisdorn et al., 1993), otros de 10 segundos (Wander, 1949), o 60 segundos (Doerr et al., 1996). Los límites entre las categorías no tienen base física, son totalmente arbitrarios y difieren entre sistemas de clasificación, pero resultan útiles para comparar suelos en relación a su grado de repelencia al agua. A su vez, el valor de WDPT a partir del cual un suelo se considera hidrofóbico varía entre trabajos, y dependerá de cuál es el punto de partida o la situación "no hidrofóbica" en cada estudio y cuáles son las implicancias de la ocurrencia del fenómeno en cada caso.

La distribución de las mediciones con esta metodología tiende a ser bimodal, con un gran número de datos de resultados bajos y altos para suelos no hidrofóbicos e hidrofóbicos respectivamente, con pocos resultados en el centro de la escala. WDPT se presenta como una adecuada metodología para estudios exploratorios, para determinar presencia o ausencia de hidrofobicidad, sin embargo no tiene buena capacidad para distinguir entre diferentes grados de hidrofobicidad (Scott, 2000). Wessel (1988) plantea que las técnicas de medición de la severidad son menos subjetivas que WDPT para determinar si un suelo es hidrofóbico, a pesar de lo cual WDPT resulta más útil en la caracterización de la humectabilidad de los suelos por una serie de factores, entre los que se destacan: su facilidad de medición, es una variable muy relacionada al riesgo de erosión porque el volumen de agua de escorrentía depende de la velocidad de infiltración de las gotas de lluvia y permite generar fácilmente categorías en las que se clasifique al suelo por su grado de hidrofobicidad.

1.1.2.2. Severidad y MED test

La energía libre de la interfase suelo-gas y el ángulo de contacto inicial dependen de las características físico-químicas de la superficie del suelo. Su estimación constituye otro enfoque para la caracterización de la hidrofobicidad. En este caso se busca describir como es el comportamiento energético de las interfaces que ocurren en un sistema constituido por una gota de un líquido sobre la superficie del suelo. Éste es el principio en el que se basa otra de las metodologías más utilizadas para caracterizar la hidrofobicidad, el MED (*Molarity of ethanol droplet*) test (Roy y McGill, 2002), que es una medición indirecta de la tensión superficial de la superficie del suelo e indica cuan fuertemente el agua es repelida en el instante inicial de contacto (Doerr, 1998).

El MED test, también llamado test de Porcentaje de etanol o test de tensión superficial crítica (Olorunfemi et al., 2014), utiliza soluciones acuosas de etanol de distinta concentración para alterar la tensión superficial del líquido (Doerr, 1998).

Gotas de estas soluciones se colocan sobre la superficie de la muestra a medir, si su infiltración no ocurre en un período de tiempo inferior a un criterio preestablecido, se procede a colocar una gota de una solución de mayor concentración. Este procedimiento continúa hasta que se encuentra una solución cuya gota infiltra en un tiempo inferior al establecido en la técnica (Watson y Letey 1970, Doerr 1998). En este caso la variable no tiene magnitud de tiempo como en la metodología WDPT, sino que el MED test cuantifica la hidrofobicidad como la concentración de etanol más baja que permite la infiltración de una gota en un tiempo inferior al establecido (Olorunfemi et al., 2014). El tiempo de infiltración exigido varía entre autores, siendo de 3 s para Doerr (1998), de 5 s para King (1981), 10 s para Harper y Gilkes (1994).

La metodología se basa en el hecho de que si una gota de agua no infiltra inmediatamente en el suelo, la tensión superficial del sólido es inferior a la tensión superficial del agua ($72,75 \times 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$) (Tschapek, 1984). La tensión superficial del etanol a 20°C es de $22,3 \times 10^{-3} \text{ N.m}^{-1}$ y su agregado al agua, constituyendo las soluciones acuosas de etanol de creciente concentración, disminuye progresivamente la tensión superficial del líquido (Doerr, 1998). En otras palabras, la cohesión del líquido disminuye, dado que las fuerzas de atracción entre una molécula de etanol y una de agua son menores que las que ocurren entre dos moléculas de agua. Esto genera que aumente la importancia relativa de las fuerzas de adhesión (atracción líquido-sólido) en desmedro de las de cohesión, a medida que aumenta la concentración de etanol. De esta manera, cuando se encuentra una solución cuya tensión superficial sea inferior a la de la superficie del suelo la misma infiltrará rápidamente.

Esta metodología tiene como ventaja en relación al WDPT test que se evitan los tiempos necesarios para alcanzar la infiltración en muestras muy hidrofóbicas (Olorunfemi et al., 2014). A su vez, pueden hacerse conversiones entre el valor de concentración de etanol en molaridad a valores de tensión superficial del suelo. Esta conversión puede hacerse utilizando ecuaciones empíricas que relacionan ambas variables (Roy y McGill, 2002).

Los dos enfoques de caracterización de la hidrofobicidad, persistencia y severidad, están íntimamente relacionados, siendo mayor la persistencia del fenómeno en aquellos suelos fuertemente repelentes (Wessel, 1988). Existen múltiples trabajos que relacionan los valores de hidrofobicidad obtenidos con el método MED y WDPT, encontrándose altas correlaciones entre ambos en trabajos como Crockford et al. (1991), Harper y Gilkes (1994) y Doerr (1998).

1.1.3. Origen de la hidrofobicidad

1.1.3.1. Hidrofobicidad y materia orgánica del suelo

La mayoría de los componentes minerales del suelo son hidrofílicos, debido a la exposición hacia la solución del suelo de grupos polares, principalmente oxhidrilo (Tschapek, 1984). Debido a esto, existe consenso en que el fenómeno de hidrofobicidad es causado por compuestos orgánicos que recubren a las partículas del suelo u ocupan parte de su porosidad, disminuyendo la atracción por el agua de toda la matriz (Doerr et al., 2000).

Se han hecho diferentes intentos por relacionar la hidrofobicidad con el contenido de materia orgánica del suelo, pero los mismos han generado resultados dispares. Algunos autores hallaron correlaciones positivas entre ambas variables. Por ejemplo, Mirbabaei et al. (2013) encontraron coeficientes de correlación lineal de Pearson entre 0,62 y 0,96 entre el contenido total de materia orgánica y el logaritmo de WDPT, en algunos sitios analizados en el norte de Irán. Mataix-Solera y Doerr (2004) también hallaron una importante asociación entre las dos variables mencionadas en suelos calcáreos del sureste de España bajo bosques de *Pinus halepensis*, en este caso el coeficiente de correlación fue de 0,714. Resultados similares se observaron por Zavala et al. (2009), trabajo en el cual se encontraron altas correlaciones entre C orgánico total y persistencia de la hidrofobicidad para suelos del suroeste de España, en bosques nativos de *Quercus suber*, *Q. canariensis*, *Olea europaea*, y comerciales de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinea*. Varela et al. (2005) llegaron a resultados similares en suelos de Galicia (España) en plantaciones

de *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.*, obteniéndose coeficientes de correlación de 0,64 entre ambas variables. Lozano et al. (2013), también encontraron coeficientes de correlación muy altos (0,87) entre WDPT y contenido total de materia orgánica, para suelos en bosques mediterráneos del sureste de España. Resultados similares se plantean en Kawamoto et al. (2007), Verheijen y Cammeraat (2007) y Mao et al. (2016).

Otros autores afirman la existencia de una correlación negativa o ningún tipo de relación entre la hidrofobicidad y el contenido de materia orgánica de los suelos. Por ejemplo, Wallis et al. (1993) estudiando arenas en la costa de Nueva Zelanda, encontraron que la hidrofobicidad medida con el MED test no tenía relación alguna con el contenido de C orgánico del suelo, planteando incluso que los sitios con mayor severidad de hidrofobicidad fueron los que tenían menor concentración de C orgánico. Resultados similares fueron obtenidos por Teramura (1980) analizando suelos arenosos bajo vegetación arbustiva en el sur de California, encontrándose los mayores niveles de persistencia de la hidrofobicidad en suelos con los más bajos niveles de materia orgánica del universo de datos estudiado. Estos elementos sustentan la hipótesis de que la hidrofobicidad está determinada más por el tipo de compuestos presentes en la materia orgánica que por la cantidad total de carbono en el suelo (Wallis et al. 1993, Woche et al. 2005), siendo la presencia de sustancias lipídicas particular responsable de la determinación de la severidad y persistencia de la repelencia al agua (Horne y McIntosh 2000, Lozano et al. 2013).

Sin embargo, existe una asociación entre el nivel de hidrofobicidad y el contenido de C orgánico en un mismo perfil (Wallis et al. 1990, Rodríguez-Alleres et al. 2007, Wang et al. 2010). Por ejemplo, Wallis et al. (1990) encontraron que los valores de severidad de la hidrofobicidad medida a través del MED test, descienden en profundidad en el perfil, estando fuertemente correlacionados con el contenido total de C orgánico en cada horizonte, con un coeficiente de correlación de 0,79. En este trabajo se encontró hidrofobicidad severa en los primeros 3 cm de suelo, moderados entre 3 cm y 15 cm y bajos entre 15 y 20 cm.

A su vez, Rodríguez-Alleres et al. (2007) plantean una evolución diferencial de la hidrofobicidad en profundidad en función de la textura del suelo. Los niveles de persistencia de la hidrofobicidad en suelos bajo *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* fueron mayores y alcanzaron mayores profundidades en suelos de texturas arenosas en comparación con suelos de texturas más finas. Según Doerr et al. (1996), la mayor profundidad alcanzada por los fenómenos de hidrofobicidad en suelos arenosos se debe a una mayor tasa de lavado de sustancias orgánicas hidrofóbicas y posterior re-precipitación, proceso asociado a conductividades hidráulicas en flujo saturado relativamente altas que caracterizan a estos suelos.

El origen de los compuestos orgánicos responsables de la generación del fenómeno de hidrofobicidad es diverso, desde la descomposición de la propia materia orgánica fresca (Wang et al., 2010) con la generación de compuestos complejos como ácidos húmicos y fúlvicos (Bisdorn et al., 1993), exudados radiculares y sustancias producidas por actividad fúngica y microbiana específica y lavado de ceras directamente desde la superficie de las hojas (Mainwaring et al., 2013). Algunos compuestos reportados como causantes de hidrofobicidad en suelo son: ceras cuticulares, alcanos y alcoholes, ácidos grasos, ésteres y sales de ácidos grasos, esteroides, proteínas hidrofóbicas, etc. (Mainwaring et al., 2013).

1.1.3.2. Compuestos responsables de la hidrofobicidad

Numerosos trabajos han buscado determinar la identidad química de los compuestos responsables del fenómeno de repelencia al agua de los suelos. Éstos se han basado en la extracción con solventes orgánicos de sustancias de suelos que mostraban la presencia del fenómeno, y la posterior aplicación de esos compuestos extraídos a suelos no hidrofóbicos para inducir la repelencia al agua (Ma'shum et al. 1988, Doerr et al. 2005). A partir de este tipo de investigaciones se ha llegado a la conclusión de que la hidrofobicidad es generada fundamentalmente por compuestos lipídicos que se depositan en el suelo (Bisdorn et al. 1993, Doerr et al. 2000).

Experimentos llevados a cabo por Lozano et al. (2013), en los que se extrajeron lípidos de muestras de suelo bajo diferentes usos forestales en bosques del sureste de España, afirman los conceptos anteriores, encontrándose fuertes correlaciones entre el contenido de compuestos lipídicos y la repelencia al agua en bosques de *Pinus halepensis* y *Quercus rotundifolia*. En este trabajo se afirma que distintas concentraciones de estos lípidos explican diferencias en el grado de hidrofobicidad de las muestras dentro de la misma especie. Los lípidos en general, y particularmente los presentes en el suelo, muestran una extraordinaria heterogeneidad en su composición, y están presentes en el suelo en una baja cantidad (aproximadamente entre 2 y 50 g.kg⁻¹), a pesar de lo cual tienen fuerte influencia en los procesos y propiedades del suelo, entre las que se destaca la hidrofobicidad (De Blas et al., 2013).

Mao et al. (2016) identificaron alta correlación entre la hidrofobicidad de suelos arenosos de Holanda y algunos compuestos carbonados de cadena larga como: ácidos grasos, alcoholes, alcanos, ácidos grasos hidroxilados, aldehídos, cetonas, ácidos dicarboxílicos, fitoles, fitanoles, amidas, colesterol, β-sitosterol. En experimentos realizados por Horne y McIntosh (2000) en suelos arenosos de Nueva Zelanda, se encontró como responsables del fenómeno a ácidos grasos como: palmítico, palmitoleico, oleico y linoleico, que son los comúnmente encontrados en plantas y animales. En este mismo trabajo se encontraron otros lípidos polares, fundamentalmente ácidos húmicos con alto peso molecular y solubilidad dependiente del pH, con cierta relevancia en la determinación de la hidrofobicidad. Estos compuestos son producidos por exudados de raíces, algunas especies de hongos, ceras de la superficie de las hojas de las plantas y materia orgánica en descomposición. Las sustancias hidrofóbicas presentes en exudados radiculares son producidas tanto por las raíces de las plantas como por microorganismos que habitan la rizósfera para promover la disponibilidad de nutrientes y evitar la deshidratación (Doerr et al., 2000).

Pedrós Marí (2003) indica la elevada importancia de algunos compuestos de síntesis fúngica como potenciales generadores de hidrofobicidad, particularmente las

hidrofobinas, una familia de proteínas de pequeño tamaño molecular con gran tendencia a la polimerización. Estas proteínas tienen un carácter particularmente anfipático, presentando ángulos de contacto con agua entre 22° y 63° en su lado hidrofílico y de aproximadamente 110° en su lado hidrofóbico (Wösten y de Vocht, 2000).

1.1.3.3. Conceptualización de la hidrofobicidad en base a química de superficies

La gran diversidad de compuestos co-responsables de la generación de hidrofobicidad en el suelo pueden ser divididos para su estudio en dos grandes grupos, hidrocarburos alifáticos y compuestos anfipáticos. El primer grupo son sustancias compuestas por carbono e hidrógeno dispuestos en largas cadenas apolares, lo que los hace insolubles en agua. Los del segundo grupo se caracterizan por tener cadenas de C e H, pero se diferencian de las anteriores por poseer en un extremo un grupo funcional ionizable. Debido a esta característica, las moléculas anfipáticas poseen un extremo polar y otro apolar, y generan fenómenos de hidrofobicidad por orientarse con sus extremos polares hacia el suelo y los apolares hacia la solución, impidiendo que el agua se acerque a las partículas o agregados del suelo (Doerr et al., 2000).

Algunos autores (De Blas et al., 2013) hacen una distinción entre compuestos lipídicos libres y ligados del suelo, de acuerdo a su facilidad de extracción mediante solventes, siendo ésta una estrategia de caracterización de la complejidad de la constitución lipídica de la materia orgánica del suelo, y un acercamiento a la determinación de la contribución relativa de estas particiones a la generación de hidrofobicidad. En dicho trabajo, los lípidos libres estuvieron constituidos fundamentalmente por sesquiterpenos en suelos bajo *Eucalyptus sp.* y por ácidos diterpénicos en los suelos bajo *Pinus sp.* Por otro lado, los principales lípidos ligados hallados fueron ácidos grasos y alcanos en suelos bajo ambas especies, siendo

extraordinariamente mayor la contribución de este grupo a la generación de hidrofobicidad.

El comportamiento diferencial de las fracciones lipídicas en el desarrollo de la hidrofobicidad es consistente con el modelo conceptual de formación de complejos órgano-minerales de estructura micelar planteado por Kleber et al. (2007). Estos autores plantean que la materia orgánica del suelo interacciona con la fase mineral en una secuencia definida. Inicialmente se desarrolla una zona de contacto, con formación de enlaces particularmente fuertes entre el extremo polar de compuestos orgánicos anfipáticos y la fase mineral, a través de enlaces de tipo ligante por la coordinación de grupos oxhidrilo. Para que esta micela hidrofóbica no quede aislada del entorno polar que constituye la solución del suelo, se relaciona con el extremo apolar de otras moléculas anfipáticas, que a su vez exponen sus extremos polares a la solución. A esta bicapa orgánica inicial se acoplan mediante atracciones no ligantes otros compuestos orgánicos, relacionándose con el extremo hidrofílico expuesto de la última capa. Este proceso crea micelas órgano-minerales en capas sucesivas, estando la primera (zona de contacto) fuertemente ligada a la fase mineral, mientras que las siguientes se relacionan más débilmente, ubicándose en la llamada capa cinética. Los compuestos orgánicos de la capa cinética experimentan altas tasas de recambio, teniendo un tiempo de residencia en las micelas relativamente bajo comparado con los compuestos de las capas internas (Kleber et al., 2007). Esto podría indicar que, si bien la materia orgánica más lábil (lípidos libres) hacen una contribución a la generación del fenómeno a través del recubrimiento de partículas y agregados, es la materia orgánica íntimamente ligada con la fracción mineral la principal responsable de la generación de hidrofobicidad, lo cual determinaría un fenómeno mucho más estable en el tiempo (De Blas et al., 2013).

Estudios realizados por Mainwaring et al. (2013), en los que se aplicaron diferentes compuestos orgánicos sobre arenas no hidrofóbicas, mostraron que una combinación de ácidos grasos con alcanos resultaba en el desarrollo de repelencia extrema al agua. Esta combinación de sustancias polares y alifáticas magnifican la repelencia al agua porque las moléculas polares como los ácidos grasos y amidas son

adsorbidas por las superficies hidrofílicas de los silicatos, exponiendo sus colas apolares hacia la solución del suelo (Ma'shum y Farmer, 1985). Se forman luego atracciones entre las colas apolares expuestas de las sustancias anteriores y las cadenas apolares de las moléculas alifáticas como alcanos, resultando en una cobertura hidrofóbica que va incrementando progresivamente su espesor en torno a las partículas del suelo, conforme al modelo de Kleber et al. (2007) planteado anteriormente. A su vez, Mainwaring et al. (2013) identificaron una relación entre el largo de cadena de los ácidos grasos y alcanos y la magnitud de la hidrofobicidad generada, siendo necesaria la presencia de compuestos de al menos 14 C de largo para que el fenómeno ocurra, mientras que aquellos con cadenas de más de 18 C serían menos efectivos como inductores de la hidrofobicidad.

La reorientación de estas sustancias anfipáticas, la formación de estructuras en bicapas y su acumulación en torno a las partículas del suelo, así como la acumulación de las alifáticas en torno a ellas (Kleber et al., 2007), es favorecida por la desecación del suelo que promueve la formación de películas hidrofóbicas (Olorunfemi et al., 2014). Debido a esto, si un suelo susceptible a desarrollar hidrofobicidad por la presencia de los compuestos mencionados se seca por debajo de cierto nivel crítico de humedad, puede cambiar su comportamiento de hidrofílico a hidrofóbico, o incrementar notoriamente la severidad y persistencia de su hidrofobicidad (Dekker et al., 2001).

1.1.3.4. Hidrofobicidad y densidad de empaque de los compuestos generadores

Existe una relación entre la magnitud de la hidrofobicidad y la densidad de empaque sobre las partículas del suelo de los compuestos carbonados responsables del fenómeno. Ácidos grasos saturados como el octanodecanoico son más efectivos en generar repelencia al agua en los suelos dado que se disponen de forma condensada y con elevada cohesión sobre las partículas y agregados. Esto se debe a las características rectas de sus cadenas carbonadas, considerándose el grado de

empaquetamiento entre estas moléculas cercano a un estado cristalino. Por el contrario, algunos ácidos grasos insaturados como el oleico, debido a la presencia de insaturaciones que impiden una disposición recta de estas moléculas, presentan menor eficiencia en desarrollar hidrofobicidad por la disposición menos compacta de sus cadenas cuando recubren las partículas del suelo (Mainwaring et al., 2013).

A su vez, hay evidencias que indican que la importancia de las características específicas de un compuesto podrían perderse si el suelo se calienta a elevadas temperaturas (naturalmente en un incendio). La elevada temperatura podría causar el rearrreglo de los compuestos orgánicos en torno a las partículas del suelo, posiblemente por recristalización. Podrían incluso ocurrir cambios conformacionales como isomerización entre formas cis o trans. Estas nuevas características tendrían como consecuencia una estructura con mayor densidad de empaque y mayor hidrofobicidad (Mainwaring et al., 2013).

1.1.3.5. Origen de las sustancias hidrofóbicas

La hidrofobicidad es función del contenido de materia orgánica del suelo y particularmente de algunos compuestos orgánicos específicos. La actividad de ciertos microorganismos del suelo y fundamentalmente el tipo de cobertura vegetal han sido planteados como los principales responsables del aporte de dichas sustancias (Doerr et al., 2000).

La rizósfera, definida como el volumen de suelo inmediato a las raíces sobre el cual éstas ejercen su mayor influencia, presenta normalmente mayores niveles de hidrofobicidad que la totalidad del suelo, esto se debe principalmente a la presencia de sustancias exudadas por las propias raíces y a compuestos secundarios de síntesis microbiana que surgen de la descomposición de los primeros (Hallett, 2008).

Diversos organismos del suelo tienen implicancias en la generación de compuestos hidrofóbicos por participar en la descomposición de los residuos vegetales acumulados en la superficie del suelo, dentro de los cuales se destaca la

importancia de ciertas especies de hongos y bacterias (Hallett et al. 2001a, Vogelmann et al. 2015). A su vez, el tipo de vegetación presente en un sitio determina de forma indirecta la presencia y el grado de hidrofobicidad por la promoción de cierto tipo de biomasa bacteriana y fúngica. Por ejemplo, la presencia de algunos grupos de hongos como los *Basidiomycetes* está fuertemente asociada a vegetación boscosa, porque éstos participan en la descomposición de materiales vegetales ricos en lignina (Jaramillo, 2006). Feeney et al. (2006), observaron un incremento simultáneo de la respiración microbiana y de la repelencia al agua del suelo en experimentos de incubación, lo que indica la relevancia de la actividad microbiana en la generación del fenómeno.

Las bacterias producen sustancias poliméricas extracelulares llamadas globalmente como biofilms en cuya composición hay una importante presencia de sustancias hidrofóbicas (Schaumann et al., 2007). Algunas especies cuya ocurrencia en el suelo ha sido asociada con la aparición de fenómenos de repelencia al agua son: *Penicillium nigricans*, *Aspergillus sydowi* y *Actinomycetes sp.* (Doerr et al., 2000). Sin embargo, se reportan dificultades en relación a la identificación de los microorganismos responsables de la ocurrencia del fenómeno (Doerr et al., 2000), debido a la gran complejidad de la biota del suelo, y sus interacciones internas, con la materia orgánica en descomposición, con la vegetación y con la fracción mineral, que dificultan el aislamiento del agente u agentes causales específicos del fenómeno de hidrofobicidad.

A su vez, Achtenhagen et al. (2015) determinaron que el tratamiento de superficies minerales con cultivos de *Pseudomonas putida* generó un aumento significativo de la hidrofobicidad medida a través del ángulo de contacto, tanto en tratamientos con fragmentos de células como con citosol. Este fenómeno de importante aumento de la hidrofobicidad es frecuentemente observado cuando se riegan suelos con aguas residuales o algún otro efluente con alto contenido de materia orgánica. A su vez, la producción de sustancias hidrofóbicas de origen bacteriano puede tener carácter facultativo, siendo notablemente mayor la repelencia al agua generada sobre superficies minerales tratadas con cultivos de estas bacterias,

cuando las mismas habían sido previamente sometidas a estrés osmótico con una solución concentrada de NaCl (Achtenhagen et al., 2015).

Diversos autores (Baumgarten et al. 2012, Achtenhagen et al. 2015) afirman que las bacterias tienen una importante capacidad de adaptación a cambios en el ambiente a través de modificaciones en las propiedades de sus membranas. Estudios realizados por Baumgarten et al. (2012) encontraron la generación de vesículas externas de membrana y biofilms, con un consecuente aumento de la hidrofobicidad de la membrana, en respuesta al tratamiento con sustancias que generaron estrés osmótico en cultivos de *Pseudomonas putida*. A su vez, Baumgarten et al. (2012) constataron un aumento notable de la concentración de ácidos grasos saturados, particularmente esteárico (C_{18:0}) como constituyente de las vesículas generadas en respuesta al estrés osmótico. Según Achtenhagen et al. (2015) estas modificaciones de las membranas celulares de la biomasa bacteriana tienen un efecto en la hidrofobicidad del suelo una vez que los residuos de estas bacterias se descomponen y se estabilizan con la fracción mineral.

Por otro lado, los hongos son reportados por varios autores (Doerr et al. 2000, Vogelmann et al. 2015) como uno de los principales inductores de hidrofobicidad en suelos. Especies del género *Basidiomycea*, que participan en la descomposición de la lignina de la biomasa de origen forestal, son considerados importantes inductores del fenómeno. Esto ocurre principalmente por la producción de algunos compuestos de síntesis exclusivamente fúngica, como las hidrofobinas, que tienen un fuerte efecto hidrofobizante (Pedrós Marí 2003, Olorunfemi et al. 2014). Lin et al. (2006), en suelos hidrofóbicos bajo coberturas forestales del género *Casuarina sp.*, aislaron hongos de los géneros: *Mucor sp.*, *Rhizopus sp.*, *Collybia sp.*, *Aspergillus sp.*, *Fusarium sp.*, *Penicillium sp.*, *Trichoderma sp.* y *Verticillium sp.*, que resultaron ser todos hidrofóbicos una vez aislados.

Las hidrofobinas son proteínas de relativo pequeño tamaño (alrededor de 100 aminoácidos), asociadas a hongos filamentosos (Linder et al. 2005, Rillig 2005), las cuales tienen un rol crucial para sostener la vida de este grupo de organismos. Son

uno de los grupos de proteínas fúngicas más ubicuas, y se caracterizan por poseer fuertes propiedades surfactantes al ser anfipáticas, y cumplen roles diversos y fundamentales desde protección de las estructuras fúngicas ante el ambiente hasta funciones estructurales (Linder et al., 2005). Una de las funciones principales que cumplen las hidrofobinas es descender la tensión superficial del ambiente acuoso en el que se desarrollan, para permitir que las hifas de los hongos puedan crecer en el aire (Willey y Wösten 2000, Linder et al. 2005). A su vez, una vez que las hifas salen al aire son recubiertas por un biofilm hidrofóbico de hidrofobinas autoensambladas que en este caso cumplen funciones protectoras (Willey y Wösten, 2000).

La capacidad de las hidrofobinas de generar repelencia al agua sobre superficies resulta notable, trabajos realizados por van der Vegt et al. (1996), en los cuales superficies hidrofóbicas de Teflón fueron cubiertas por un tipo específico de hidrofobina, produjeron una superficie incluso más hidrofóbica que el polímero de Teflón por sí solo. Esto ocurre por la formación de una doble capa de hidrofobina, en la cual la parte hidrofílica forma su parte central y las hidrofóbicas interactúan con el Teflón en un lado y con el exterior del otro.

Aún no está claro cuál es el mecanismo mediante el cual estas sustancias secretadas por los hongos generan repelencia al agua en los suelos, pero se hipotetiza que, debido a su fuerte carácter anfipático, puedan recubrir agregados y partículas en un proceso altamente dependiente del contenido de agua del medio. La reorientación de este tipo de moléculas en función de la humedad del suelo haría que el mismo se vuelva extremadamente hidrofóbico en seco cuando los extremos apolares estén expuestos hacia el espacio poroso, mientras que la hidrofobicidad disminuiría con el aumento del contenido de humedad del suelo al quedar parcialmente expuestas las zonas polares de estas proteínas hacia la solución (Rillig, 2005).

Por otro lado, Rodríguez-Alleres et al. (2007) afirman que la vegetación es el principal factor determinante de la hidrofobicidad. Según Doerr et al. (2000) las formas de vegetación más comúnmente asociadas con fenómenos de hidrofobicidad son las compuestas por especies arbóreas perennes. También ha sido reportado el fenómeno en suelos bajo usos agrícolas (Keizer et al., 2007), bajo formaciones vegetales arbustivas (Verheijen y Cammeraat, 2007) o pastizales (Dekker y Ritsema, 1994).

En cuanto a las especies arbóreas destacan aquellas que generan una importante cantidad de resinas, ceras y aceites aromáticos (Doerr et al. 2000, Verheijen y Cammeraat 2007), como son las pertenecientes al género *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.* (Doerr et al. 1996, 2000). Debido a la dificultad de descomposición de estos compuestos, y la dinámica de la distribución de la materia orgánica en suelos bajo cobertura forestal, estas sustancias tienden a acumularse en la superficie del suelo (Rodríguez-Alleres et al., 2007).

Además del aporte directo de ceras, resinas y aceites aromáticos por parte de la vegetación forestal al suelo, su efecto acidificante se atribuye como causal indirecta de la repelencia al agua, al promover el desarrollo de biomasa fúngica, fuertemente asociada a la producción de sustancias hidrofóbicas (Doerr et al. 2000, Rodríguez-Alleres et al. 2007, Vogelmann et al. 2015). A su vez, promueve la formación de humus tipo mor, el cual también ha sido frecuentemente asociado con el fenómeno de repelencia al agua (Rodríguez-Alleres et al., 2007).

Rodríguez-Alleres et al. (2007) encontraron en suelos bajo *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.* niveles de repelencia al agua superiores que en suelos bajo agricultura y pasturas, teniendo esta propiedad una correlación con el contenido total de C del suelo. En este trabajo se encontraron valores promedio de C orgánico similares entre suelos bajo *Eucalyptus globulus* y bajo *Pinus pinaster*, a pesar de lo cual la persistencia de la hidrofobicidad fue sensiblemente superior en el primero de los casos. Doerr et al. (1996) plantean también que los niveles de hidrofobicidad son mayores en suelos bajo cobertura de *Eucalyptus sp.* y que esta diferencia se debería a

que el tipo de materia orgánica aportada por la cobertura de *Eucalyptus sp.* sería más hidrofóbica y/o generadas en cantidades mayores. Esto se alinea con lo planteado por (Hernández et al., 2013), según los cuales el stock promedio acumulado anual de mantillo debajo de *Eucalyptus grandis* es estadísticamente superior al acumulado bajo *Pinus taeda*. Una hipótesis adicional es que las mayores tasas transpiratorias de *E. globulus* generarían un mayor secado del suelo en períodos de déficit hídrico y la mayor precipitación de compuestos orgánicos en torno a las partículas del suelo (Doerr et al. 1996, Rodríguez-Alleres et al. 2007).

Scott (2000) comparó la hidrofobicidad medida por diferentes métodos en suelos de distintas características y bajo diferentes coberturas en Sudáfrica. Los usos del suelo comparados fueron: cobertura forestal con *Eucalyptus sp.*, *Pinus sp.*, *Acacia sp.*, y suelos bajo cobertura de pastizales. El componente que contribuyó más a la variación fue el factor uso del suelo, siendo los suelos bajo cobertura de *Eucalyptus sp.* los que presentaron mayor repelencia al agua. Zavala et al. (2009) llegaron a resultados similares estudiando severidad y persistencia de la hidrofobicidad en suelos del sureste de España. Los suelos bajo cobertura de *Eucalyptus globulus* resultaron más hidrofóbicos que los cubiertos por *Pinus pinaster*, *Quercus suber* u *Olea europea*, siendo solamente superados por suelos bajo *Erica australis*, una especie arbustiva muy resistente a la sequía.

Algunos trabajos realizados en Europa central comparan suelos bajo cobertura de especies de coníferas (*Picea abies*) con especies latifoliadas caducas (*Fagus sylvatica*), siendo notablemente mayor la generación de hidrofobicidad de las primeras (Butzen et al., 2015). Esto se alinea con lo planteado por Doerr et al. (2000) y Mataix-Solera et al. (2007) en relación a la mayor incidencia de especies perennes en desarrollar el fenómeno que las caducas. Doerr et al. (2006) encontraron que tanto la persistencia como la severidad de la hidrofobicidad de suelos de regiones templado húmedas del Reino Unido es muy elevada bajo coberturas de vegetación permanente de distinto tipo, como arbustivas, pastizales y bosques de coníferas. Bughici y Wallach (2016) llegaron a resultados similares en suelos con distintas

características texturales, bajo plantaciones de olivos (*Olea europea*) con riego en una región árida de Israel.

Algunos autores hipotetizan con una potencial funcionalidad de la hidrofobicidad en relación a la vegetación arbórea (Doerr et al. 2000, Olorunfemi et al. 2014). El establecimiento de vías preferenciales para el movimiento del agua en el perfil del suelo hace que las raíces de los árboles, más grandes y profundas que las de plantas herbáceas, puedan utilizar agua que está a profundidades mayores y que no está disponible para plantas que desarrollan sus sistemas radiculares de forma más superficial (Scott, 2000). Estas últimas también se verían perjudicadas por una menor capacidad de retención de agua de las zonas más superficiales del perfil del suelo, con una consecuente promoción de su conservación en profundidad debido a flujos preferenciales (Doerr et al., 2000), promoviéndose también una desecación parcial de la superficie del suelo que acentuaría los procesos anteriores.

El fuego también es frecuentemente reportado como mecanismo responsable de la generación de repelencia al agua de los suelos. El quemado de los restos vegetales depositados sobre el suelo, genera una transferencia de calor dentro del perfil que imprime cambios en sus características químicas e inciden sobre el desarrollo de hidrofobicidad (DeBano, 2000). La magnitud de los efectos de los incendios sobre las propiedades de los suelos dependen de la cantidad de calor generada en el proceso de combustión de la biomasa, por lo tanto de la intensidad del fuego y de la duración de la combustión (Finley y Glenn, 2010). Durante la combustión sustancias orgánicas hidrofóbicas son volatilizadas, pudiendo luego dirigirse a la atmósfera o dentro del suelo a través de su porosidad siguiendo gradientes decrecientes de temperatura (Olorunfemi et al., 2014). Una vez que estos compuestos alcanzan una zona del perfil con menor temperatura los mismos condensan promoviendo el recubrimiento uniforme de las partículas del suelo, las cuales se vuelven hidrofóbicas (Doerr et al., 2000).

La hidrofobicidad se incrementa en función de la temperatura desarrollada durante un incendio hasta un máximo, que en general es seguido por una caída

abrupta de la hidrofobicidad, debida a la combustión de los compuestos responsables del fenómeno (Doerr et al., 2004). Este hallazgo ha sido ratificado por numerosos autores, pero dicha temperatura máxima reportada varía entre trabajos, en un rango entre 175°C y 500°C (DeBano y Krammes 1966, DeBano 2000, Doerr et al. 2004, Arcenogui et al. 2007). Estas diferencias podrían deberse a las características del suelo, del propio material vegetal combustible o la duración del incendio (Arcenogui et al., 2007). Este último factor fue particularmente analizado por DeBano y Krammes (1966) sometiendo muestras de suelo naturalmente hidrofóbicas a diferentes niveles de temperaturas de quemado por tiempos variables, encontrando que el sometimiento de las muestras de suelo a mayor temperatura y/o tiempos más prolongados destruyó su carácter hidrofóbico. La temperatura de quemado también es función del contenido de humedad del suelo, razón por la cual la magnitud de la hidrofobicidad desarrollada durante un incendio es mayor cuanto más seco esté el suelo (DeBano et al. 1976, Huffman et al. 2001).

La durabilidad de la hidrofobicidad desarrollada por incendios depende de los mismos factores que determinan su severidad. La repelencia al agua generada por incendios de baja o moderada intensidad, generalmente es menos durable que la desarrollada en incendios intensos (DeBano, 2000). La durabilidad del fenómeno también depende de la complejidad de los compuestos orgánicos que se volatilizaron, por ejemplo si ocurrieron fenómenos de acomplejamiento de los compuestos orgánicos formados con cationes de alta valencia como Al (DeBano, 2000).

Generalmente, el patrón de desarrollo de repelencia al agua en suelos a causa de incendios es distinto al que ocurre naturalmente de forma asociada a la vegetación. En este caso, la combustión de la materia orgánica en superficie oxida completamente los compuestos orgánicos causantes de la hidrofobicidad, mientras que a mayores profundidades ocurre un incremento importante de la temperatura del suelo sin causar la destrucción de los compuestos orgánicos hidrofóbicos. Como resultado de este proceso se da generalmente la generación de una capa no hidrofóbica superficial seguida por capas hidrofóbicas inferiores (Letey, 2001).

1.1.4. Relación de la hidrofobicidad con otras propiedades del suelo

1.1.4.1. Hidrofobicidad y textura del suelo

La proporción de las distintas fracciones granulométricas del suelo tiene una importante relación con la hidrofobicidad (Doerr et al. 2006, Hallett 2008), desarrollándose mayoritariamente o con mayor intensidad sobre suelos arenosos (Doerr et al. 2006, Wahl 2008). La causa de este comportamiento es que un suelo de texturas predominantemente arenosas tiene menos superficie específica que uno de texturas más finas, y es más fácilmente recubierto por las moléculas orgánicas responsables de repeler el agua (Giovannini y Lucchesi 1983, Hallett 2008, Olorunfemi et al. 2014). Otra causa que explica esta relación entre la hidrofobicidad y la textura es la mayor capacidad de retención de agua de los suelos de texturas más finas (Rodríguez-Alleres et al., 2007), teniendo en cuenta que la hidrofobicidad es función del contenido de humedad del suelo debido a su efecto sobre la orientación de las sustancias anfipáticas que causan la repelencia. Woche et al. (2005) afirman que en suelos arenosos, incluso bajos contenidos de C orgánico son capaces de generar importantes niveles de hidrofobicidad.

Según Capriel et al. (1995), la textura influye sobre la composición de la materia orgánica del suelo y, por lo tanto, sobre la actividad microbiana y la hidrofobicidad. En este trabajo se determinó que la materia orgánica de suelos arenosos tiene mayor proporción de grupos alquilo y menor proporción de carbohidratos y proteínas que aquellos de texturas finas, lo cual influenciaría el desarrollo de mayor hidrofobicidad en los primeros. La preservación selectiva de compuestos orgánicos con grupos alquilo, de carácter hidrofóbico, en suelos arenosos se debería a su carácter recalcitrante en relación a la descomposición microbiana. Por otro lado, su empobrecimiento relativo en compuestos hidrofílicos (mayoría de los carbohidratos y proteínas) en relación a los arcillosos, se debería a la presencia de mecanismos químicos y físicos de estabilización de la materia orgánica de carácter más débil.

Rodríguez-Alleres et al. (2007) plantean una asociación entre la textura del suelo y la estratificación de la hidrofobicidad, encontrando que esta propiedad se desarrolla de forma más superficial en suelos de granulometría fina, mientras que alcanza mayores profundidades en suelos arenosos. Una razón podría ser la mayor superficie específica de los primeros que hace necesaria una mayor cantidad de compuestos orgánicos para cubrir las partículas de un cierto volumen de suelo. Otra razón de este comportamiento podría ser un mayor lixiviado de compuestos orgánicos como consecuencia de la mayor macroporosidad en suelos arenosos.

Sin embargo, existen antecedentes como los trabajos de Scott (2000) y Vogelmann et al. (2010) en los cuales no se encontró relación alguna entre la granulometría del suelo y el desarrollo de hidrofobicidad. Incluso existen antecedentes (Doerr et al., 1996) en los cuales las fracciones más finas del suelo resultaron ser más hidrofóbicas que las fracciones gruesas.

1.1.4.2. Hidrofobicidad y humedad del suelo

Numerosos autores coinciden en que la hidrofobicidad varía con el contenido de humedad del suelo, haciéndose más pronunciada cuando el suelo está seco, mientras que desciende o desaparece completamente después de precipitaciones intensas o durante periodos extendidos de alto contenido de agua en el suelo (De Jonge et al. 1999, Doerr et al. 2000, Scott 2000, Kawamoto et al. 2007, Hallett 2008, Vogelmann et al. 2013a). Debido a esto, la presencia del fenómeno puede no siempre ser identificable a campo (Scott, 2000).

Keizer et al., (2007) plantean que el contenido de humedad del suelo es el principal factor de variación espacio-temporal de la hidrofobicidad. Sin embargo, incluso cuando otros elementos determinantes como la cobertura del suelo están controlados, la humedad del suelo no puede explicar esa variabilidad por sí sola, influyendo también otros factores como la actividad microbiana y radicular.

Algunos autores (Doerr y Thomas 2000, Vogelmann et al. 2013b) plantean que existe un contenido de humedad de equilibrio para cada suelo por encima del cual pierde su carácter hidrofóbico y se vuelve hidrofílico, siendo este valor progresivamente mayor ante aumentos del contenido de materia orgánica. En suelos de texturas franco-arenosas del noroeste de Portugal la repelencia al agua desaparece cuando los suelos alcanzan un contenido de humedad gravimétrico promedio de 28%, y no necesariamente se re-establece cuando son secados nuevamente (Doerr y Thomas, 2000). Resultados similares son expuestos por Butzen et al. (2015), midiendo hidrofobicidad en bosques nativos manejados de coníferas y latifoliadas en Alemania, observando que el fenómeno se evidenciaba solamente cuando el contenido de humedad del suelo era relativamente bajo, disminuyendo progresivamente con el aumento del contenido de humedad, hasta que las muestras se volvían completamente hidrofílicas. En este estudio se determinó un contenido volumétrico de humedad de equilibrio de 34%. En un experimento previo en el Reino Unido, Doerr et al. (2006) determinaron un valor crítico de 28% en volumen, por encima del cual el suelo se volvía completamente hidrofílico.

Sin embargo, algunos autores (Dekker et al. 2001, Rodríguez-Alleres et al. 2007) afirman que la hidrofobicidad potencial, medida en una muestra secada en laboratorio, puede subestimar el nivel de repelencia al agua del suelo en condiciones de campo luego de un período de sequía, concluyendo que las variaciones estacionales de la hidrofobicidad no son únicamente producto de la variación en el contenido de humedad del suelo. En este trabajo se sugiere extraer muestras durante períodos de sequía para determinar el nivel potencial de repelencia al agua.

Los cambios que se evidencian en el grado de hidrofobicidad del suelo en función del contenido de humedad del mismo se deben a fenómenos de reorientación de sustancias anfipáticas (Kleber et al. 2007, Diehl 2013, Mainwaring et al. 2013). Un material mantiene su carácter repelente al agua mientras que la capa orgánica que lo cubre, compuesta fundamentalmente por moléculas anfipáticas, se mantiene inalterada (Mainwaring et al., 2013). Según Doerr et al. (2000), a medida que el contenido de agua del suelo aumenta, la atracción entre las moléculas de agua y el

extremo polar de los mencionados compuestos hidrofóbicos (que en un suelo seco se orientan hacia las partículas del suelo) debilitaría la atracción entre éstos y la matriz del suelo. Eventualmente, se alcanzaría un punto en el cual habría una reorientación de estos compuestos con sus extremos hidrofílicos hacia la solución del suelo, alcanzándose una situación de no repelencia (Doerr et al., 2000). A su vez, cuando la humedad del suelo es alta las moléculas hidrofóbicas tienden a agregarse. Este proceso puede relacionarse a la tendencia del agua a reducir la superficie de contacto de estos compuestos con la solución del suelo, lo que tiene como consecuencia que los mencionados compuestos tengan menor contacto con las partículas minerales del suelo, reduciendo la hidrofobicidad (Rezus y Bakker, 2007).

Por el contrario, cuando el suelo se seca los films de agua que recubren las partículas del suelo se hacen sucesivamente más delgados y las succiones de matriz superiores. Al suceder esto, las moléculas hidrofóbicas acompañan el acercamiento del agua hacia las partículas del suelo y tienden a envolverlas. Cuando la humedad alcanza niveles muy bajos, los extremos polares de estas moléculas tienden a ser atraídos por las partículas del suelo, mientras que sus extremos apolares e hidrofóbicos quedan expuestos hacia el espacio poroso. De esta forma se da el recubrimiento de las partículas y agregados del suelo, volviéndose repelentes al agua (Mataix-Solera et al., 2013).

1.1.4.3. Hidrofobicidad y pH

Numerosos trabajos plantean que los suelos ácidos son más susceptibles a desarrollar hidrofobicidad que los suelos alcalinos (Cerdà y Doerr 2007, Mataix-Solera et al. 2007). Particularmente, Cerdà y Doerr (2007) encontraron niveles mucho menores de hidrofobicidad en suelos calcáreos bajo *Pinus sp.* que los desarrollados en suelos ácidos, y asumen que el pH fue un factor determinante en este resultado. A su vez, existen reportes que afirman la exitosa reducción de la hidrofobicidad en suelos ácidos al aumentar el pH con encalado (Roper, 2005).

Mataix-Solera et al. (2007) investigaron la ocurrencia de hidrofobicidad en suelos calcáreos con diferentes coberturas forestales en una región semiárida del sureste de España, encontrando niveles más bajos de hidrofobicidad cuanto mayor era el pH. Zavala et al. (2009) hallaron una clara asociación negativa entre hidrofobicidad y pH en suelos bajo coberturas de pinos, eucaliptos y alcornos.

La relación planteada entre hidrofobicidad y pH podría deberse a distintas causas, como una mayor actividad de microorganismos degradadores de compuestos hidrofóbicos a pH altos (Diehl, 2013) o la promoción de la solubilización de materia orgánica humificada y su remoción (Mcghie y Posner 1980, Diehl 2013). Por otro lado, Hurraß y Schaumann (2006) afirman que la protonación a pH bajos de grupos funcionales cargados negativamente puede ser responsable de la interrelación entre pH e hidrofobicidad, al promoverse una pérdida de carga neta de los coloides con una consecuente disminución del potencial de matriz por una menor adhesión de las moléculas de agua. Otros autores (Lin et al., 2006) plantean que la humectabilidad de ácidos húmicos y fúlvicos, medida a través del ángulo de contacto, aumentó con el incremento del pH. Esta asociación estaría explicada por la solubilidad de los ácidos húmicos y fúlvicos, que se incrementa con el aumento del pH, lo cual determinaría su potencial lavado desde el suelo a pH elevados (Lin et al., 2006).

El pH del suelo también tiene un efecto indirecto sobre la hidrofobicidad, promoviéndose una mayor abundancia y diversidad de biomasa fúngica a pH ácidos (Zavala et al., 2009), la cual es reportada por diversos autores (Doerr et al. 2000, Vogelmann et al. 2015) como uno de los principales inductores de la repelencia al agua en los suelos.

1.1.5. Variabilidad de la hidrofobicidad

La repelencia al agua es una propiedad con elevada variabilidad espacio-temporal (Doerr et al. 2000, Dekker et al. 2001, Mataix-Solera et al. 2007, Bodí et al. 2013, Lozano et al. 2013, Butzen et al. 2015). Butzen et al. (2015) encontraron importantes diferencias en mediciones de WDPT distanciadas escasos centímetros

entre sí, en suelos bajo bosques de coníferas y latifoliadas nativas del suroeste de Alemania. Este tipo de variabilidad, debido a su distribución espacial, se define como variabilidad a micro escala (medida en el orden de cm o mm) y resulta de gran relevancia porque determina una gran heterogeneidad en propiedades físicas que determinan la relación infiltración/escorrimento (Hallett et al., 2004) con consecuencias sobre el desarrollo de flujos preferenciales, transporte acelerado de contaminantes y erosión. Cierta proporción de la heterogeneidad espacial de la hidrofobicidad es consecuencia de otras características muy variables como la estructura de la porosidad del suelo o pequeñas variaciones topográficas y sus implicancias sobre el almacenamiento de agua (Hallett et al., 2004).

En el mismo sentido, Hubbert et al. (2006) determinaron que la variación encontrada entre réplicas de mediciones con el método WDPT en un área de 15 x 15 cm² era similar a la encontrada en una cuenca de 1,28 hectáreas. Burguet et al. (2016) encontraron que los resultados de las mediciones de repelencia al agua, independientemente del método utilizado, mostraban una muy alta variabilidad espacial en suelos bajo plantaciones de olivos en el sur y este de España, con una distribución espacial en forma de parches, coexistiendo zonas de relativa elevada hidrofobicidad con otras de baja o nula repelencia. Esta variación estaría explicada por la distribución de la materia orgánica y del ambiente microbiano del suelo a dicha escala (Nunan et al., 2002), así como por movimientos horizontales de compuestos hidrofóbicos causados por variaciones microtopográficas, que implican la pérdida del carácter hidrofóbico en algunos sitios y el aumento de su severidad en otros (Hubbert et al., 2006). Según Bodí et al. (2013), también influiría la forma en la que se distribuye la biomasa fúngica, que ocurre en forma de parches, tanto sobre la superficie como dentro del suelo, e incluso dentro de los agregados (Urbanek et al., 2007), liberándose compuestos hidrofóbicos como las hidrofobinas con el mismo patrón. Esta secreción de proteínas hidrofóbicas tendría como uno de sus objetivos constituir una estrategia para competir con otros microorganismos, introduciendo variación espacial y temporal en el contenido de agua y controlando su distribución (Dechesne et al., 2007).

Por otro lado, algunos autores (Keizer et al., 2007) afirman que las variaciones microtopográficas son la principal variable explicativa de la heterogeneidad espacial de la hidrofobicidad, mientras que en el tiempo la severidad y persistencia del fenómeno pueden modificarse de forma importante en un período inferior a dos semanas, debido fundamentalmente a cambios en el contenido de agua del suelo.

1.1.6. Sistema de laboreo e hidrofobicidad

Numerosos autores (Hallett et al. 2001b, Blanco-Canqui et al. 2009, Pikul et al. 2009, Šimon et al. 2009, González-Peñaloza et al. 2012) afirman que la repelencia al agua depende también del tipo de laboreo utilizado. Estudios realizados por Hallett et al. (2001b) mostraron mayor hidrofobicidad en suelos bajo un sistema de mínimo laboreo en comparación con arado convencional. Estos autores plantean que el efecto del tipo de laboreo sobre las propiedades hidráulicas en ese caso puntual, depende más del desarrollo de hidrofobicidad que de la estructura de la porosidad, debido a las altas sortividades medidas para soluciones de etanol de menor tensión superficial.

En la misma línea, Blanco-Canqui (2011) afirma que la agricultura sin laboreo induce 1,5 a 40 veces más hidrofobicidad que los sistemas con laboreo convencional. Este efecto se basa en la mayor acumulación de materia orgánica y el muy bajo nivel de perturbación, que a su vez promueven el desarrollo de biomasa microbiana que, como se ha mencionado, tiene un rol fundamental en la generación de compuestos hidrofóbicos. González-Peñaloza et al. (2012) llegan a la misma conclusión de que el laboreo convencional promueve la mineralización de la materia orgánica, reduciendo la hidrofobicidad generada por compuestos orgánicos. Pikul et al. (2009) plantean que las diferencias en hidrofobicidad de los suelos con y sin laboreo se deben tanto al tipo como a la cantidad de compuestos carbonados, siendo mayor la presencia de ceras en las situaciones de suelo en sistemas sin laboreo. Chan (1992) plantea que la principal razón que explica la reducción de la hidrofobicidad en suelos perturbados es el menor crecimiento de micelios de hongos, responsables fundamentales del fenómeno.

Por otro lado, las diferencias en relación a esta propiedad entre distintos sistemas de laboreo está confinada a la zona más superficial del perfil de suelo, atribuyéndose este comportamiento a una mayor concentración de materia orgánica y menor de arcilla en suelos sin laboreo con respecto a los laboreados (Blanco-Canqui y Lal 2009, Šimon et al. 2009). El laboreo incorpora arcilla de horizontes inferiores, promueve la oxidación de la materia orgánica, interrumpe procesos microbianos (fundamentalmente fúngicos), reduciendo la hidrofobicidad (Blanco-Canqui y Lal, 2009).

Los antecedentes planteados, que tienen un enfoque sobre sistemas agrícolas, introducen nuevos elementos para comprender por qué el desarrollo de hidrofobicidad se asocia a sistemas forestales. En estos sistemas ocurre un importante aporte de compuestos orgánicos hidrofóbicos como fue planteado en secciones previas, pero además los procesos mediante los cuales ocurre dicho aporte determinan una elevada estratificación de dichos compuestos en el perfil. A su vez, la baja frecuencia de intervenciones con laboreo que caracteriza a los sistemas forestales determina baja tasa de pérdida y de movimientos en el perfil de las sustancias hidrofóbicas depositadas.

1.1.7. Consecuencias de la hidrofobicidad

Varias son las implicancias que diferentes autores atribuyen a la hidrofobicidad, siendo un motivo de preocupación por sus efectos medioambientales y económicos. Cerdà y Doerr (2007) plantean que incluso baja hidrofobicidad determina una importante reducción en la infiltración, ocurriendo una inversión del normal comportamiento a través del cual existen mayores tasas de infiltración en un suelo seco con respecto a uno húmedo. Este elemento ha sido expuesto en otros trabajos (Letey et al. 1962, Letey 2001), en los cuales se observó que las tasas de infiltración en suelos hidrofóbicos tienden a aumentar con el tiempo en las etapas iniciales del proceso, contrariamente a lo que ocurre en suelos hidrofílicos, en los cuales decrece con el tiempo desde el instante inicial de contacto con el agua. Este

hecho tiene distintas implicancias, desde una menor disponibilidad de agua en el suelo para la absorción vegetal hasta un incremento de la erodabilidad por una modificación de la relación infiltración/escorrimento. Cerdà y Doerr (2007) plantean la fundamental relevancia de la cobertura vegetal para prevenir la erosión, cuyo riesgo se encuentra incrementado por el desarrollo de hidrofobicidad. A su vez, el riesgo de erosión asociado a la repelencia al agua tiene particular relevancia en aquellos lugares en los cuales existe una fuerte alternancia de períodos de sequía y lluvias intensas (Madsen et al., 2011).

Butzen et al. (2015), evaluando suelos bajo bosques en Alemania, observaron una marcada tendencia a mayores tasas de escurrimiento en suelos hidrofóbicos, a través del establecimiento de ensayos de escurrimiento con simulador de lluvia. A su vez, los suelos hidrofóbicos también se caracterizaron por tener menores períodos de tiempo hasta el comienzo de la escurrimiento desde el inicio de la incidencia de la lluvia generada por el simulador.

En relación a la influencia de la hidrofobicidad sobre la erodabilidad de los suelos, Vogelmann et al. (2013a) establecen argumentos que no se alinean con los anteriores, planteando que existe una correlación positiva entre la hidrofobicidad, el contenido de materia orgánica y la estabilidad de los agregados, lo que contribuiría a una menor erodabilidad. Estos autores plantean que la reducción de la infiltración hace que los agregados se mantengan secos por más tiempo, posibilitando que las fuerzas cohesivas entre las partículas primarias actúen por tiempos más prolongados y de forma más intensa que en un suelo no hidrofóbico, generando mejores condiciones para el desarrollo de estructura del suelo. También establecen que este aumento de la estabilidad de los agregados generaría una mayor resistencia ante el efecto disgregador de los agentes erosivos. Sin embargo, este planteo no establece una relación causal clara entre las variables analizadas. La bibliografía sobre la temática se alinea en afirmar que tanto el fenómeno de hidrofobicidad como la estructura están correlacionados positivamente (y fuertemente según algunos autores) con el contenido total de carbono orgánico del suelo. Si ambas variables dependen de esta última, es altamente probable que suelos con alto contenido de C orgánico

presenten elevada estabilidad estructural e hidrofobicidad, aunque no exista una relación causal necesaria entre estas dos últimas. Mataix-Solera et al. (2011) se alinean con lo expuesto por los anteriores autores, encontrando una correlación positiva entre la estabilidad estructural del suelo y la hidrofobicidad causada por incendios. En este caso se infiere que compuestos orgánicos hidrofóbicos generados durante la combustión, recubren las partículas y agregados del suelo y comienzan a actuar como agentes cementantes, desencadenando el fenómeno observado.

Madsen et al. (2011) destacan la importancia de la influencia del desarrollo de repelencia al agua sobre la capacidad de retención de agua de los suelos. En estudios realizados en bosques de *Pinus sp.* y *Juniperus sp.* incendiados en Utah observaron una menor cantidad de agua retenida en suelos con hidrofobicidad al menos ligera en comparación con los no hidrofóbicos. Estas diferencias fueron encontradas incluso en muestreos realizados durante el invierno, cuando los ingresos de agua al sistema por precipitaciones son notablemente mayores. Esta menor capacidad de retención de agua del suelo disminuye su disponibilidad para la restauración de bosques incendiados a partir del banco de semillas o plantación (Madsen et al., 2011).

Una consecuencia hidrológica del desarrollo de hidrofobicidad que es frecuentemente reportada en la bibliografía es el desarrollo de frentes de humedecimiento inestables (Letey, 2001). Este fenómeno ocurre cuando el frente de humedecimiento avanza de forma acelerada en zonas aleatorias generando un patrón de humedecimiento en forma de “dedos”, pudiéndose encontrar zonas de suelo muy seco aledañas a zonas de suelo muy húmedo.

2. Cambios en las propiedades hídricas del suelo por sustitución de pasturas por cobertura forestal

Maximiliano González Sosa¹, Oscar José Bentancur², Mario Pérez Bidegain³

¹ Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Av. Garzón 780, Montevideo, Uruguay. Email: mgonzalezfagro@gmail.com

² Estación Experimental Mario Cassinoni, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Paysandú, Uruguay. Email: obent@fagro.edu.uy

³ Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Av. Garzón 780, Montevideo, Uruguay. Email: mperezb@fagro.edu.uy

2.1. Resumen

El cambio del uso del suelo de pastoril a forestal en zonas de clima templado húmedo genera incertidumbre sobre su impacto en el medio ambiente. El principal objetivo de este trabajo fue determinar el impacto sobre las propiedades hídricas de los suelos del cambio de uso de vegetación natural de pasturas por plantaciones forestales, el efecto de la especie forestal utilizada y su relación con cambios en la concentración de C. Particularmente, se buscó identificar el desarrollo de hidrofobicidad y cambios en la capacidad de retención de agua del suelo. Se analizaron dos experimentos forestales aledaños instalados en el año 2003 (uno con *Eucalyptus grandis* y otro con *Pinus taeda*) a tres densidades de plantación (816, 1111 y 2066 árboles/ha), extrayéndose muestras imperturbadas de suelo (0-3 cm de profundidad) de los experimentos y de áreas de pasturas circundantes. Se determinó la hidrofobicidad del suelo por la metodología WDPT (*Water drop penetration time*) a tres niveles de potencial de matriz, así como el contenido de agua y de carbono orgánico del suelo. El cambio del uso del suelo de pastoril a forestal determinó un aumento significativo de la hidrofobicidad en la superficie del suelo (559,2 - 388,7 + 1275,2 s en suelo forestado y 17,9 - 6,9 + 11,4 s bajo campo natural), el cual fue mayor en coberturas de *Eucalyptus grandis* (1134,7 - 644,8 + 1493,7 s) (P=0,041), teniendo un efecto de disminución de su capacidad de retención de agua. La magnitud de esta propiedad aumentó con la disminución del potencial de matriz a

una tasa que depende del uso del suelo. El cambio del uso del suelo de pastoril a forestal en zonas de clima templado húmedo determina un aumento de la hidrofobicidad en superficie que incide sobre una pérdida de capacidad de retención de agua del mismo.

Palabras clave: Repelencia al agua, Campo natural, Forestación, Retención de agua.

2.2. Abstract

Land use changes from native pastures to forest plantations in humid temperate areas generate uncertainty about their impact on the environment. The main objective of this work was to determine the impact on soil water properties due to the land use change from native pastures to forest plantations, the specific effect of the forest species and its relationship with changes in the soil C concentration. Particularly, the identification of soil hydrophobicity and changes in the water retention capacity were sought. Two nearby forestry experiments installed in 2003 were analyzed (one with *Eucalyptus grandis* and the other with *Pinus taeda*) at three planting densities (816, 1111 and 2066 trees / ha). Undisturbed soil samples (0-3 cm deep) from the area of the experiments and surrounding grassland were extracted. Soil water repellency was determined by the WDPT (Water drop penetration time) method at three levels of matrix potential. Water content at each matrix potential level and soil organic carbon were also determined. The land use change from pastures to forest plantations determined a significant increase in soil surface hydrophobicity (559.2 s - 338.7 s + 1275.2 s in forested land and 17.9 s - 6.9 s + 11.4 s in native pastures), which was higher under *Eucalyptus grandis* cover (1134.7 s - 644.8 s + 1493.7 s) ($P = 0.041$). These changes also determined a decrease in its water holding capacity. Soil water repellency increased with the diminution of soil matrix potential at a rate that depends on land use. Land use change from native pastures to forest plantations in humid temperate areas enhances soil surface water repellency, which determines a decrease in water holding capacity.

Keywords: Soil water repellency, Native pastures, Afforestation, Soil water holding capacity.

2.3. Introducción

La hidrofobicidad o repelencia al agua se define como la disminución de la capacidad del suelo de atraer el agua, resistiendo y retardando el proceso de humedecimiento por períodos variables de tiempo⁽¹⁾⁽²⁾. Es un fenómeno ampliamente distribuido en el mundo⁽³⁾, cuya ocurrencia ha sido determinada en climas muy diversos y en suelos bajo usos muy variados⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾. Tiene importancia tanto por sus implicancias productivas como ambientales, destacándose una menor cantidad de agua disponible en el suelo para el crecimiento vegetal por la disminución de la tasa de infiltración⁽⁸⁾, mayor escurrimiento e incremento de la erodabilidad del suelo⁽⁷⁾⁽⁹⁾, generación de frentes de humedecimientos inestables y flujos preferenciales⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ y, como consecuencia, lixiviado potencialmente acelerado de contaminantes⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾.

La forma más utilizada de caracterización del fenómeno es la medición de la duración o persistencia del carácter de repelencia al agua de una superficie⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ a través de la técnica WDPT (*Water drop penetration time*), que consiste en colocar gotas de agua en la superficie del suelo determinando el tiempo que las mismas demoran en infiltrar⁽¹⁶⁾. La hidrofobicidad del suelo es función de las características físico-químicas de su superficie⁽¹⁷⁾, y esta técnica constituye una forma de estimar dichas características, sustentándose en que la hidrofobicidad es función del tiempo de contacto entre el suelo y el agua, ocurriendo un aumento progresivo de la tensión superficial de la superficie del suelo y una disminución de la del agua hasta que finalmente ocurre la infiltración⁽¹⁸⁾.

Son varios los autores que hallaron correlaciones positivas entre la persistencia o severidad de la hidrofobicidad y el contenido de materia orgánica del suelo⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾. Sin embargo, existen trabajos en los cuales no se encontró relación alguna entre dichas variables⁽²¹⁾⁽²²⁾. Debido a esto, la hidrofobicidad del suelo no estaría solamente determinada por la cantidad de materia orgánica sino también por el tipo de compuestos presentes⁽¹⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾. El principal factor que determina la presencia de compuestos orgánicos hidrofóbicos y el desarrollo del fenómeno de repelencia al agua es la vegetación⁽⁵⁾⁽¹⁹⁾⁽²³⁾. Se destaca la importancia de especies arbóreas perennes que generan una importante cantidad de resinas, ceras y aceites aromáticos⁽¹⁾⁽²⁵⁾, como son las pertenecientes al género *Pinus sp.* y

Eucalyptus sp.⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽²⁶⁾, como responsables de generación de hidrofobicidad en los suelos. A su vez, varios autores destacan la mayor incidencia de las coberturas de *Eucalyptus sp.* sobre las de *Pinus sp.* en la determinación del fenómeno⁽⁵⁾⁽¹⁴⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾. Esta diferencia se debería a que el tipo de materia orgánica aportada por la cobertura de *Eucalyptus sp.* sería más hidrofóbica y/o generada en cantidades mayores. Esto concuerda con lo planteado por Hernández y otros⁽³⁰⁾, según los cuales el stock promedio acumulado anual de mantillo debajo de *Eucalyptus grandis* es superior al acumulado bajo *Pinus taeda*. A su vez, la dinámica de la distribución de la materia orgánica en suelos bajo uso forestal determina que dichas sustancias se acumulen en superficie, desarrollándose el fenómeno fundamentalmente en la zona más superficial del suelo mineral⁽⁵⁾.

La problemática del desarrollo de hidrofobicidad en los suelos ha sido fundamentalmente estudiada en zonas con forestación como vegetación nativa, tanto en climas tropicales húmedos⁽⁶⁾⁽³¹⁾, fríos y húmedos⁽⁷⁾⁽³²⁾ como templados semiáridos⁽⁵⁾⁽²⁶⁾⁽³³⁾. Sin embargo, es escasa la información desarrollada en zonas de clima templado húmedo en las cuales se haya sustituido vegetación natural de pasturas por sistemas forestales. A su vez, el fenómeno generalmente se ha estudiado en sitios que llevan largos períodos bajo cobertura forestal, por lo que resulta relevante la caracterización de las tasas a las que ocurre su desarrollo a partir de la sustitución de pasturas por forestación a distintas densidades.

Dado lo anterior la hipótesis de este trabajo es que el cambio de uso del suelo de pastoril a forestal genera un incremento de la hidrofobicidad en la superficie del suelo mineral, y esta es mayor bajo coberturas de *Eucalyptus sp.* que de *Pinus sp.*, y mayor a densidades de plantación más elevadas. También se espera que la hidrofobicidad esté asociada positivamente al contenido de carbono orgánico del suelo y negativamente a su contenido de agua, y que suelos hidrofóbicos tengan una menor capacidad de retención de agua. El objetivo general de este trabajo fue determinar el efecto de la sustitución de la vegetación natural de pasturas por plantaciones forestales sobre la persistencia de la hidrofobicidad y la capacidad de retención de agua del suelo y su relación con cambios en el contenido de carbono orgánico del mismo. Se plantearon los siguientes objetivos específicos: determinar si existe un impacto diferencial en estas propiedades del tipo de cobertura forestal (*Pinus taeda* o *Eucalyptus grandis*), y de la densidad de plantación, y determinar si existe una relación

entre la hidrofobicidad desarrollada bajo cada uso del suelo y el contenido de humedad que tenía el mismo en el momento de la medición.

2.4. Materiales y métodos

Este trabajo fue realizado en dos experimentos aledaños instalados en el año 2003, uno con *Eucalyptus grandis* y otro con *Pinus taeda*. El sitio estaba ubicado en el establecimiento “Los Moros” (ruta 5, km 451, departamento de Rivera, Uruguay, coordenadas: 31°23'55,11”S y 55°41'43,88”O). Los suelos dominantes en el sitio experimental corresponden a Hapludalfs y Hapludults de acuerdo a la clasificación de USDA⁽³⁴⁾.

En cada uno de los experimentos fueron dispuestos tres tratamientos de densidades de plantación (816, 1111 y 2066 árboles.ha⁻¹) en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se extrajeron 7 muestras imperturbadas de 0 a 3 cm de profundidad de suelo mineral en anillos cilíndricos de 68,71 cm³ de volumen de la entrefila de cada unidad experimental (126 muestras en total) y de zonas de campo natural aledañas (23 muestras), para determinación de la persistencia de la hidrofobicidad. A su vez, se extrajeron 4 muestras independientes, de las mismas características, de cada una de las parcelas y de la zona de campo natural para determinación de densidad aparente. El muestreo se realizó en un único día durante el mes de mayo del 2017. Previo a la realización de las mediciones, las muestras fueron mantenidas bajo refrigeración a una temperatura de 4 °C.

2.4.1. Determinación de densidad aparente del suelo e hidrofobicidad a distintos niveles de succión

La determinación de la densidad aparente se llevó a cabo por el método del anillo, saturando las muestras con agua por 24 h, de acuerdo a García-Préchac y Kaplán⁽³⁵⁾. La determinación de la persistencia de la hidrofobicidad se realizó por el método WDPT⁽¹⁶⁾ en muestras equilibradas previamente a 10, 33 y 100 kPa en platos de cerámica⁽³⁶⁾. Previamente

a la primer determinación de la hidrofobicidad se preparó cuidadosamente la superficie de las muestras extrayendo las fracciones de mayor tamaño correspondientes al horizonte O, procurando exponer la interfase que separa el horizonte A del O. Luego se colocaron 5 gotas de agua desionizada sobre dicha superficie con un gotero y se midió el tiempo en segundos que tardaron en infiltrar. La medida de WDPT para cada muestra resultó del promedio de tiempo de infiltración de las 5 gotas.

Para la asignación del orden de medición de las muestras se diseñó un bloqueo administrativo, por el cual se secó y midió una muestra de cada unidad experimental en cada tanda.

2.4.2. Determinación del contenido de agua a cada nivel de succión y contenido de C orgánico

Se midió la masa de cada una de las muestras luego de haber alcanzado el equilibrio a 10, 33 y 100 kPa de succión, y previamente a la realización del WDPT test. Luego de determinar la hidrofobicidad a 100 kPa se dividió cada muestra aproximadamente a la mitad. Una de estas mitades se estratificó, obteniéndose una submuestra correspondiente a 1 cm de la zona más superficial, en la cual se determinó porcentaje de carbono orgánico⁽³⁷⁾.

La otra mitad de la muestra fue pesada para determinar un coeficiente "m" (masa total/masa con cuarteo) y secada en estufa a 105°C por dos días para determinar su masa seca. A través del producto de esta masa y el coeficiente "m" calculado anteriormente se determinó la masa seca total de la muestra. Por diferencia de la masa a cada nivel de succión y la masa seca, se calculó el contenido de humedad de cada muestra a 10, 33 y 100 kPa, expresándolo como porcentaje de humedad gravimétrica (HP) y volumétrica (HV). La conversión de HP a HV se realizó utilizando los valores de densidad aparente calculados previamente.

2.4.3. Análisis estadístico

2.4.3.1. Efecto del cambio de uso del suelo de pasturas nativas a forestación sobre el desarrollo de hidrofobicidad.

Se construyeron intervalos de confianza ($\alpha=0,05$) para la media de la variable WDPT en suelo bajo cobertura forestal en general, de *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda* en particular, y se los comparó con el valor promedio de WDPT de las muestras de suelo bajo campo natural, a cada nivel de succión.

2.4.3.2. Efecto de la especie forestal y densidad de plantación sobre la hidrofobicidad del suelo a cada nivel de succión.

Los datos correspondientes a la variable WDPT para suelos bajo uso forestal fueron analizados mediante un modelo factorial con dos factores: especie forestal y densidad de plantación, con tres repeticiones para cada combinación de niveles de cada factor. Los niveles correspondientes al factor especie forestal fueron: cobertura de *Eucalyptus grandis* y cobertura de *Pinus taeda*, mientras que los niveles para el factor densidad de plantación fueron: 816, 1111 y 2066 árboles/ha. Debido a que las observaciones de la variable WDPT se asocian a una distribución gamma y, como consecuencia, es heterocedástica, el análisis fue hecho en el marco de los modelos lineales generalizados con una función de enlace logarítmica. El modelo estadístico planteado es el siguiente:

$$Y_{ijk} = e^{\beta_0 + \alpha_i + \gamma_j + (\alpha\gamma)_{ij} + \beta_k(\alpha_i)} + \varepsilon_{ijk}$$

donde Y_{ijk} es la variable dependiente WDPT, α_i es el efecto del factor especie forestal, γ_j es el efecto del factor densidad de plantación, $(\alpha\gamma)_{ij}$ es el efecto de la interacción de los factores especie forestal y densidad de plantación, $\beta_k(\alpha_i)$ es el efecto de bloque evaluado dentro de especie y ε_{ijk} es el error experimental. Se realizó un análisis a cada nivel de succión (10, 33 y 100 kPa) como si fueran experimentos distintos. El modelo lineal generalizado extiende el modelo lineal general para poder estudiar variables de distribución no normal. Se caracteriza por tener una función de enlace (logarítmica en este caso), que relaciona el predictor lineal compuesto por una sumatoria de variables explicativas con el

componente aleatorio definido por la variable de respuesta y su distribución de probabilidades (38).

2.4.3.3. Efecto de la succión sobre la hidrofobicidad.

Para evaluar el efecto del nivel de succión, asociado a la cantidad de agua en el suelo, sobre la hidrofobicidad se planteó el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = e^{\beta_0 + \alpha_i + \gamma_j} + \varepsilon_{ij}$$

donde Y_{ij} es la variable dependiente WDPT, α_i es el efecto del factor nivel de succión, γ_j es el efecto bloque (muestra de suelo) y ε_{ij} es el error experimental.

2.4.3.4. Efecto de la especie forestal y densidad de plantación sobre la tasa de aumento de la hidrofobicidad del suelo ante cambios en el nivel de succión.

Se generaron nuevas variables correspondientes a los cocientes de la persistencia de la hidrofobicidad a 100 y 10 kPa y de la persistencia de la hidrofobicidad a 100 y 33 kPa respectivamente, como variables explicativas de la tasa de aumento de la hidrofobicidad ante descensos del contenido de humedad correspondientes a un aumento del nivel de succión del suelo. Estas variables fueron analizadas con el mismo modelo estadístico planteado para la variable WDPT en la sección 2.2.3.2.

2.4.3.5. Relación entre hidrofobicidad y contenido de carbono orgánico e hidrofobicidad y retención de agua del suelo.

Se realizó un análisis de correlación entre la variable WDPT a cada nivel de succión, WDPT a 100 kPa / WDPT a 10 kPa y WDPT a 100 kPa / WDPT a 33 kPa, con % de C orgánico del suelo, determinándose el coeficiente de correlación lineal de Spearman para cada caso.

A su vez, se llevaron a cabo análisis de correlación Spearman entre la variable WDPT y HV a diferentes niveles de succión para cada caso.

Los suelos analizados a cada nivel de succión y bajo cada tratamiento fueron clasificados según un sistema de clasificación de suelos por su persistencia de hidrofobicidad

de Bisdom ⁽³⁹⁾. Los análisis fueron llevados a cabo con el software R ⁽⁴⁰⁾. Las diferencias fueron consideradas significativas a un $P < 0,05$ para todos los parámetros y como una tendencia a un $P < 0,1$.

2.5. Resultados

2.5.1. Efecto del cambio en el uso del suelo sobre la hidrofobicidad a diferentes niveles de succión

La Tabla 1 presenta el valor medio de WDPT y los límites del intervalo de confianza para los diferentes usos del suelo y a los tres niveles de succión ensayados. La media de WDPT bajo uso forestal fue 6,4 veces, 11,6 veces y 31,2 veces mayor que bajo campo natural a 10, 33 y 100 kPa de succión respectivamente. Al considerar las especies forestales por separado, el valor de WDPT promedio bajo cobertura de *Pinus taeda* fue 5,0 veces, 8,2 veces y 15,4 veces mayor que bajo campo natural a 10, 33 y 100 kPa de succión respectivamente. Por otro lado, la media de esta variable bajo cobertura de *Eucalyptus grandis* fue 8,3 veces, 16,4 veces y 63,4 veces mayor que bajo campo natural a 10, 33 y 100 kPa de succión respectivamente.

En todos los niveles de succión evaluados los intervalos de confianza de la media de WDPT del suelo bajo campo natural y bajo uso forestal no se solaparon (Tabla 1). Tampoco ocurrió solapamiento del intervalo de confianza de la media de WDPT en campo natural a cada nivel de succión en relación a los intervalos de confianza para la media de WDPT bajo cobertura de *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda* evaluados por separado (Tabla 1). Esto permite afirmar, con 95% de confianza, que la media de WDPT bajo campo natural es diferente a la media de esta variable bajo uso forestal en general, y bajo cada una de las especies forestales en particular.

Tabla 1. WDPT según nivel de succión y uso del suelo

Uso	10 kPa			33 kPa			100 kPa		
	Media (s)	Li	Ls	Media (s)	Li	Ls	Media (s)	Li	Ls
Campo natural	7,4	6,1	9,0	13,0	10,8	15,7	17,9	14,4	22,1
Forestal	47,6	32,6	69,6	150,3	88,7	254,7	559,2	309,8	1009,6
<i>Eucalyptus grandis</i>	61,1	40,3	92,5	212,8	119,6	378,8	1134,7	594,9	2164,2
<i>Pinus taeda</i>	37,1	24,5	56,2	106,1	59,6	188,9	275,6	144,5	525,6

Los límites inferior (Li) y superior (Ls) corresponden a los límites del intervalo de confianza de la media al 95%

La Tabla 2 presenta la distribución relativa por clase de hidrofobicidad siguiendo la clasificación propuesta por Bisdom y otros ⁽³⁹⁾. Al fijar el nivel de succión del suelo bajo cobertura de campo natural en 10 kPa, un 13% de las muestras resultaron ser hidrofílicas y un 87% ligeramente hidrofóbicas. A 33 kPa, no hubo ningún caso de hidrofílicidad (WDPT ≤5 s) y el 100% de las muestras quedaron comprendidas en la categoría de ligera hidrofobicidad. A 100 kPa de succión, no cambió la categorización dada a 33 kPa con respecto a la clasificación usada, sin embargo sí se observó un cambio de distribución dentro de esta última categoría hacia rangos de mayor hidrofobicidad (Tabla 2).

En muestras correspondientes a suelos bajo cobertura forestal equilibradas a 10 kPa, un 70,1% de las muestras fueron ligeramente hidrofóbicas, y un 29,9% fuertemente hidrofóbicas. A 33 kPa un 24,4% de las muestras resultaron ligeramente hidrofóbicas, un 69,3% fuertemente hidrofóbicas y un 6,3% severamente hidrofóbicas. A 100 kPa, solamente un 10,2% de las mismas fueron ligeramente hidrofóbicas, un 58,3% fuertemente hidrofóbicas, un 27,6% severamente hidrofóbicas y 3,9% extremadamente hidrofóbicas (Tabla 2).

Tabla 2. Frecuencia relativa de clases de persistencia de hidrofobicidad del suelo según succión y uso del suelo

Uso del suelo	Succión (kPa)	No hidrofóbico	Ligeramente hidrofóbico			Fuertemente hidrofóbico			Severamente hidrofóbico		Extremadamente hidrofóbico
		≤5s	(5-10]	(10-30]	(30-60]	(60-180]	(180-300]	(300-600]	(600-900]	(900-3600]	(3600-18000]
CN	10	13,0	65,2	21,7							
	33		30,4	69,6							
	100		4,3	82,6	13,0						
Forestal	10		5,5	32,3	32,3	29,1	0,8				
	33		0,8	7,1	16,5	46,5	17,3	5,5	6,3		
	100		0,8	3,1	6,3	16,5	10,2	31,5	10,2	17,3	3,9

2.5.2. Efecto de la especie forestal y densidad de plantación sobre la hidrofobicidad del suelo a cada nivel de succión

La figura 1 presenta los valores promedio de WDPT según especie forestal (*Pinus taeda* o *Eucalyptus grandis*) y succión (10, 33 y 100 kPa). La especie forestal afectó la variable WDPT a 100 kPa de succión ($P=0,041$). A dicho potencial, la hidrofobicidad del suelo bajo cobertura de *Eucalyptus grandis* expresada como WDPT fue 4,1 veces mayor que bajo *Pinus taeda*. A 10 y 33 kPa de succión, se detectó una tendencia de mayor hidrofobicidad en suelos bajo *Eucalyptus grandis* en comparación con *Pinus taeda* ($P=0,076$ a 10 kPa, $P=0,070$ a 33 kPa), siendo esta variable 1,65 veces y 2 veces superior bajo cobertura de *Eucalyptus grandis* con respecto a cobertura de *Pinus taeda*, a 10 y 33 kPa de succión respectivamente. La densidad de plantación no afectó la variable WDPT (Fig. 2).

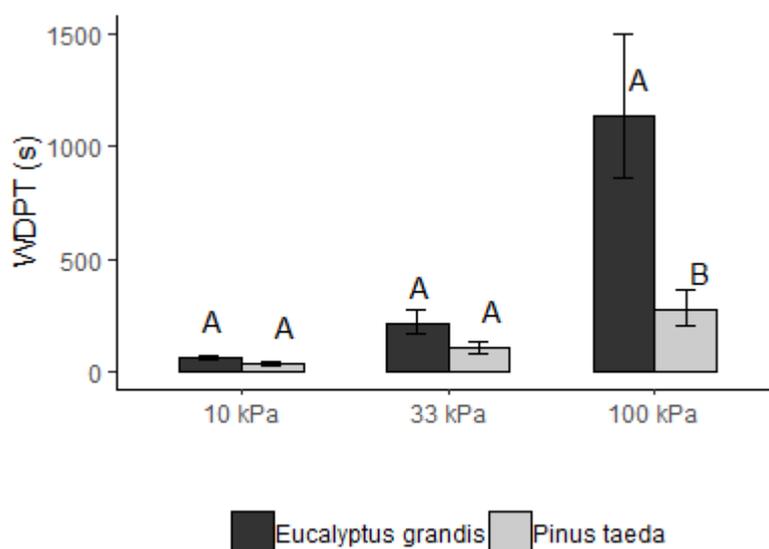


Figura 1. Hidrofobicidad como WDPT(s) según especie forestal (*Pinus taeda* o *Eucalyptus grandis*) y succión (10, 33 y 100 kPa). Diferentes letras dentro de cada nivel de succión indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

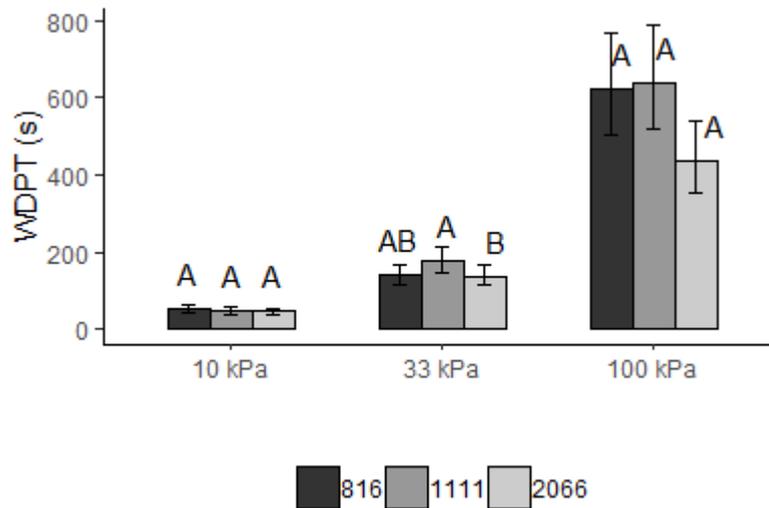


Figura 2. Hidrofobicidad como WDPT(s) según densidad de plantación (816, 1111 y 2066 árboles/ha) y succión (10, 33 y 100 kPa). Diferentes letras dentro de cada nivel de succión indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

La Tabla 3 muestra la distribución de las clases de hidrofobicidad según especie forestal a distintos niveles de succión. En los suelos bajo *Pinus taeda*, un 75% de las muestras resultaron ligeramente hidrofóbicas y un 25% fuertemente hidrofóbicas a 10 kPa. A 33 kPa, el porcentaje de muestras ligeramente hidrofóbicas cayó a 39,1%, hubo 59,3% de casos fuertemente hidrofóbicos y 1,6% severamente hidrofóbicos. A 100 kPa, solamente hubo 18,8% de muestras ligeramente hidrofóbicas, 71,8% resultaron fuertemente hidrofóbicas y 9,4% severamente hidrofóbicas.

Para suelos bajo cobertura de *Eucalyptus grandis* a 10 kPa, el 65,1% de las muestras fueron ligeramente hidrofóbicas y el 34,9% fuertemente hidrofóbicas. A 33 kPa, el 9,5% de los casos fueron ligeramente hidrofóbicos, el 79,4% fueron fuertemente hidrofóbicos y el 11,1% severamente hidrofóbicos. A 100 kPa, el 1,6% de las muestras fueron ligeramente hidrofóbicas, 44,4% fuertemente hidrofóbicas, 46% severamente hidrofóbicas y aparecieron 7,9% de casos con hidrofobicidad extrema.

Tabla 3. Frecuencia relativa de clases de persistencia de hidrofobicidad del suelo según especie forestal y nivel de succión

Especie forestal	Succión (kPa)	No hidrofóbico	Ligeramente hidrofóbico			Fuertemente hidrofóbico			Severamente hidrofóbico		Extremadamente hidrofóbico
		≤5s	(5-10]	(10-30]	(30-60]	(60-180]	(180-300]	(300-600]	(600-900]	(900-3600]	(3600-18000]
Pinus	10		9,4	39,1	26,6	25,0					
	33		1,6	14,1	23,4	40,6	15,6	3,1	1,6		
	100		1,6	6,3	10,9	25,0	15,6	31,3	4,7	4,7	
Eucalyptus	10		1,6	25,4	38,1	33,3	1,6				
	33				9,5	52,4	19,0	7,9	11,1		
	100				1,6	7,9	4,8	31,7	15,9	30,2	7,9

2.5.3. Efecto de la succión sobre la hidrofobicidad

Existe un efecto significativo ($P < 0,0001$) del factor nivel de succión sobre la variable WDPT (Fig. 3). La media de la variable WDPT a 33 kPa fue 2,58 veces mayor que a 10 kPa de succión. A su vez, al secar el suelo desde un contenido de agua correspondiente a 10 kPa hasta uno correspondiente a 100 kPa de succión, su hidrofobicidad se incrementó 7,97 veces en promedio.

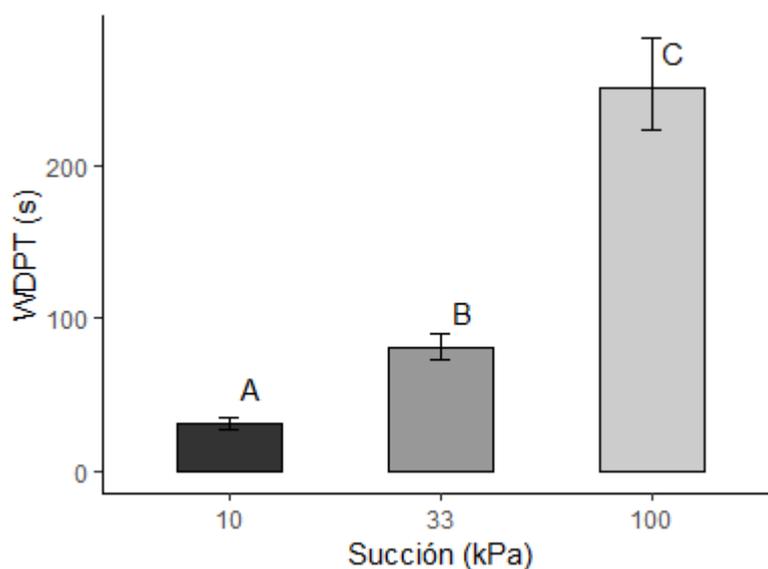


Figura 3. Hidrofobicidad como WDPT(s) según nivel de succión (10, 33 y 100 kPa). Diferentes letras dentro de cada nivel de succión indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

2.5.4. Efecto de la especie forestal sobre la tasa de aumento de la hidrofobicidad del suelo

El análisis de las variables WDPT 100 kPa / WDPT 10 kPa y WDPT 100 kPa / WDPT 33 kPa mostró significancia para el factor especie forestal en ambos casos ($P < 0,0001$), pero no para los otros factores de variación considerados. La media de la variable WDPT 100 kPa / WDPT 10 kPa fue $18,58 \pm 11,49$ para *Eucalyptus grandis* y $7,69 \pm 4,38$ para *Pinus taeda*, mientras que la media de la variable WDPT 100 kPa / WDPT 33 kPa fue $5,36 \pm 1,83$ para *Eucalyptus grandis* y $2,59 \pm 0,87$ para *Pinus taeda*.

2.5.5. Relación entre la hidrofobicidad y contenido de C orgánico

La Tabla 4 muestra los resultados de los análisis de correlación entre las variables WDPT a cada nivel de succión, WDPT a 100 kPa / WDPT a 10 kPa y WDPT a 100 kPa / WDPT a 33 kPa, con contenido de C orgánico del suelo, con el correspondiente coeficiente de correlación lineal de Spearman asociado. Cuando el análisis fue realizado para la totalidad de las muestras de suelo bajo cobertura forestal el coeficiente de correlación lineal de Spearman para el análisis de correlación entre las variables WDPT y contenido de C orgánico fue positivo, con valores de 0,55, 0,44 y 0,14 a 10 kPa, 33 kPa y 100 kPa de succión respectivamente. Para coberturas de *Pinus taeda* la asociación fue ligeramente menor, con coeficientes de 0,42, 0,32 y 0,34 a 10 kPa, 33 kPa y 100 kPa de succión respectivamente. En el caso de coberturas de *Eucalyptus grandis*, la asociación fue mayor a succiones bajas (0,58 a 10 kPa), evolucionando a 0,33 a 33 kPa, y cayendo a 0,02 a 100 kPa de succión. La relación entre el porcentaje de C orgánico y las tasas de aumento de la hidrofobicidad ante aumentos del nivel de succión no fueron claras en ninguna de las coberturas forestales consideradas.

Tabla 4. Coeficiente de correlación lineal de Spearman entre las variables C orgánico (%) y WDPT 10 kPa, WDPT 33 kPa, WDPT 100 kPa, WDPT 100 kPa / WDPT 10 kPa y WDPT 100 kPa / WDPT 33 kPa

	C orgánico (%)		
	Todas las muestras	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Pinus taeda</i>
WDPT 10kPa	0.55	0.58	0.42
WDPT 33kPa	0.44	0.33	0.32
WDPT 100 kPa	0.37	0.02	0.34
WDPT 100 kPa/ WDPT 10 kPa	0.14	-0.53	0.2
WDPT 100 kPa/ WDPT 33 kPa	0.23	-0.19	0.37

2.5.6. Relación entre capacidad de retención de agua del suelo e hidrofobicidad

Los resultados de los análisis de correlación entre WDPT y capacidad de retención de agua son presentados en la Tabla 5. El coeficiente de correlación lineal de Spearman calculado para las variables HV y WDPT resultó negativo a diferentes niveles de succión

cuando se analizó todo el conjunto de muestras, alcanzando un valor de -0,33 a 100 kPa de succión. A su vez, los suelos bajo cobertura de campo natural y los de cobertura de *Eucalyptus grandis*, tanto cuando fueron analizados en conjunto como por separado, mostraron coeficientes de correlación negativos, con un mínimo de -0,55 a 100 kPa de succión para muestras bajo *Eucalyptus grandis* y campo natural analizadas en conjunto. Al analizar exclusivamente las muestras bajo cobertura de *Eucalyptus grandis* los coeficientes fueron de: -0,08, -0,14 y -0,33 a 10, 33 y 100 kPa de succión respectivamente. Sin embargo, su valor fue positivo cuando el análisis fue realizado para el conjunto de muestras correspondientes a cobertura de *Pinus taeda*.

Tabla 5. Coeficiente de correlación lineal de Spearman entre las variables HV y WDPT para diferentes conjuntos de muestras a distintos niveles de succión.

Conjunto de muestras	Succión		
	10 kPa	33 kPa	100 kPa
Todas las muestras	-0,03	-0,17	-0,33
<i>Eucalyptus grandis</i>	-0,08	-0,14	-0,33
<i>Eucalyptus grandis</i> - Campo natural	-0,21	-0,33	-0,55
<i>Pinus taeda</i>	0,26	0,12	0,22
<i>Pinus taeda</i> - campo natural	0,04	-0,12	-0,21

2.6. Discusión

El cambio de uso del suelo de campo natural a forestal determinó un aumento de la hidrofobicidad en superficie (Tabla 1). Antecedentes colocan al tipo de cobertura del suelo como el principal factor determinante del fenómeno de repelencia al agua⁽⁵⁾⁽¹⁹⁾⁽²³⁾ y muchos la asocian con coberturas forestales que se caracterizan por aportar grandes cantidades de resinas, ceras y aceites aromáticos al suelo⁽¹⁾⁽²⁵⁾. Estos compuestos de características químicas hidrofóbicas son, a su vez, de elevada dificultad de descomposición y tienden a acumularse en superficie por la dinámica de la distribución de la materia orgánica en suelos bajo cobertura forestal⁽⁵⁾, lo cual contribuye al desarrollo del fenómeno de repelencia al agua en dicha zona del perfil. Sin embargo, estos trabajos estudiaron el desarrollo de hidrofobicidad en el suelo bajo coberturas forestales nativas o en plantaciones forestales comerciales que sustituyeron otras formaciones leñosas previas. Se constata, por lo tanto,

que la sustitución de pasturas nativas por plantaciones forestales logra una tasa de modificación de las propiedades hídricas del suelo de suficiente magnitud para generar cambios identificables en su hidrofobicidad en un período de 14 años.

A su vez, la repelencia al agua desarrollada en suelos bajo cobertura de *Eucalyptus grandis* resultó ser superior a la desarrollada bajo cobertura de *Pinus taeda* (Fig. 1). Estos resultados coinciden con los hallados por numerosos trabajos anteriores⁽⁵⁾⁽¹⁴⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾, en los cuales los suelos forestados no provienen de pasturas nativas previas y/o están en una situación climática distinta a una condición templado húmeda, y resaltan la mayor incidencia de las coberturas de especies del género *Eucalyptus sp.* en relación a las del género *Pinus sp.* Rodríguez-Alleres y otros⁽⁵⁾ encontraron un nivel de hidrofobicidad mayor en suelos bajo bosques de *Eucalyptus globulus* en relación a la desarrollada en suelos bajo cobertura de *Pinus pinaster* en el noroeste de España. Otros autores llegaron a resultados similares comparando la hidrofobicidad en la superficie de suelos con y sin incendios previos, determinando que los suelos bajo *Eucalyptus globulus* resultaron más hidrofóbicos que los suelos bajo *Pinus pinaster*⁽²⁷⁾. A su vez, Scott⁽²⁹⁾ en suelos de Sudáfrica y Zavala y otros⁽¹⁴⁾ en el sureste de España llegan a las mismas conclusiones. Algunos autores plantean que los mayores niveles de hidrofobicidad desarrollados en suelos bajo cobertura de especies del género *Eucalyptus sp.* se deberían al tipo de materia orgánica aportada por estas especies, el cual tendría un carácter más hidrofóbico, o a una mayor tasa de acumulación de sustancias de este tipo en el suelo⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾. Esto concuerda con lo planteado por Hernández y otros⁽³⁰⁾, según los cuales el stock de carbono en el mantillo debajo de *Eucalyptus grandis* es superior al acumulado bajo *Pinus taeda*, correlacionándose con un mayor contenido de carbono orgánico en la biomasa aérea de bosques de *Eucalyptus grandis* en relación a los de *Pinus taeda*. Rodríguez-Alleres y otros⁽⁵⁾ plantean también que las mayores tasas transpiratorias de *Eucalyptus sp.* generan un mayor secado del suelo en períodos de déficit hídricos y la mayor precipitación de compuestos orgánicos en torno a las partículas del suelo. En este trabajo se evidenció una asociación positiva entre las variables relacionadas a la hidrofobicidad (WDPT a 10, 33 y 100 kPa de succión) con el porcentaje de C orgánico, lo que indica que suelos con mayor contenido de carbono orgánico presentan mayor persistencia de la hidrofobicidad. Sin embargo, la mencionada asociación no resultó muy fuerte (Tabla 4), lo que indicaría que es más relevante en términos relativos el cambio de tipo de compuestos carbonados presentes

en la materia orgánica del suelo, al cambiar el uso de pastoril a forestal, que los cambios en la cantidad total de materia orgánica, como variable explicativa de los cambios evidenciados en la variable WDPT.

La densidad de plantación no afectó la persistencia de la hidrofobicidad en el suelo, (Fig. 2). Esto podría explicarse por el hecho de que el efecto del tipo de materia orgánica es más importante que la cantidad, lo cual concuerda con trabajos previos⁽¹⁹⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾. Esta interpretación asume que la cantidad de materia orgánica aportada por la cobertura forestal crece con el aumento de la densidad de plantación. Sin embargo, Hernández y otros⁽³⁰⁾, evaluando bosques de *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis* en el noreste de Uruguay, no encontraron diferencias estadísticamente significativas en la biomasa de mantillo acumulada entre diferentes densidades de plantación inicial (816, 1111 y 2066 árboles/ha), lo cual se explicaría fundamentalmente por una compensación en la biomasa aérea al disminuir la densidad de plantación, desarrollándose árboles de mayor tamaño de copa. Entonces, la cantidad de materia orgánica capaz de aportar compuestos hidrofóbicos al suelo sería similar entre bosques con densidades de plantación diferentes, lo que es coherente con la ausencia de diferencias identificadas en la hidrofobicidad al comparar distintos tratamientos de densidad de plantación forestal.

Existe un claro efecto del potencial de matriz del suelo sobre la hidrofobicidad. La persistencia de la repelencia al agua es progresivamente mayor a medida que se seca el suelo a succiones más elevadas (Tabla 2 y 3), resultando ser el nivel de succión un factor significativo en la determinación de la hidrofobicidad (Fig. 3). Otros trabajos coinciden en que la hidrofobicidad varía con el contenido de agua del suelo, haciéndose más pronunciada cuando el suelo está seco, mientras que desciende o desaparece completamente después de precipitación intensa o durante periodos extendidos de alto contenido de agua en el suelo⁽⁷⁾⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾. Algunos autores plantean que al aumentar el contenido de agua del suelo habría una tendencia a la reorientación de sustancias hidrofóbicas anfipáticas, con una consecuente disminución del nivel de repelencia al agua de toda la matriz⁽¹⁾⁽⁴⁴⁾. En los trabajos mencionados se evaluó la relación entre la hidrofobicidad y el contenido de agua in situ, o secando las muestras de suelo al aire o en estufa por períodos y a temperaturas variables. Sin embargo, en este caso se fijó la humedad del suelo correspondiente a

diferentes energías de retención o potenciales de matriz como una forma de reducir la variabilidad generada por los mecanismos alternativos enumerados.

El desarrollo de hidrofobicidad tuvo implicancias sobre la capacidad de retención de agua de los suelos a diferentes potenciales de matriz (Tabla 4). Existe una asociación negativa entre las variables WDPT y HV para las coberturas más contrastantes en cuanto a la hidrofobicidad desarrollada, lo cual indica una pérdida de capacidad de retención de agua ante aumentos de la hidrofobicidad, la cual se acentúa a niveles de succión mayores. Esto se alinea con los mecanismos físico-químicos propuestos que explican el desarrollo del fenómeno⁽¹⁾⁽⁴⁴⁾; la progresiva reorientación de moléculas anfipáticas en torno a las partículas del suelo a medida que disminuye su contenido de humedad y la exposición de sus colas apolares hacia la solución, disminuyen su capacidad de atraer eléctricamente moléculas de agua. Esto modifica el potencial de matriz del suelo desde sus bases físico-químicas, lo cual se visualiza en la pérdida de capacidad de retención de agua, fenómeno que se acentúa a niveles de succión elevados. Este sería el proceso que determina la progresiva pérdida de capacidad de retención de agua de un suelo hidrofóbico comparado con uno no hidrofóbico cuando ambos se secan, siendo mayor la reorientación de compuestos hidrobobizantes en el primero de los casos, aumentando la diferencia entre sus capacidades de retención de agua a medida que se los evalúa a succiones más elevadas.

Los mecanismos físico-químicos planteados anteriormente⁽¹⁾⁽⁴⁴⁾ explicarían también la existencia de un efecto significativo de la especie forestal sobre la tasa de cambio de la hidrofobicidad. El suelo cuya cobertura le aporta una mayor cantidad de compuestos hidrofóbicos (*Eucalyptus grandis*) tendrá una mayor capacidad de incremento de la hidrofobicidad por reorientación de los mismos ante disminuciones de la humedad, en relación a aquellos con otros tipos de cobertura (*Pinus taeda*).

2.7. Conclusiones

Los resultados hallados en este trabajo sugieren que el cambio de uso del suelo de pastoril a forestal en zonas de clima templado húmedo determina un aumento de la hidrofobicidad en la superficie del suelo mineral. Sin embargo, incluso el uso correspondiente a campo natural resulta ser al menos ligeramente repelente según la clasificación utilizada. El

aumento de la repelencia depende de la especie forestal utilizada, siendo mayor en el caso de coberturas de *Eucalyptus grandis* que de *Pinus taeda*. La densidad de plantación forestal no influye en el desarrollo de hidrofobicidad, dentro del rango evaluado, posiblemente debido a una compensación en la caída de mantillo asociada a un mayor volumen de copa por árbol en densidades menores. Existe una asociación positiva entre la hidrofobicidad y el contenido de carbono orgánico del suelo, aunque la baja magnitud de dicha asociación indica una mayor dependencia del fenómeno con el tipo de compuestos carbonados que con su cantidad total. La persistencia de la hidrofobicidad depende del contenido de agua del suelo, aumentando con incrementos crecientes a medida que disminuye la cantidad de agua en el suelo. La tasa de aumento de la hidrofobicidad con el descenso de la humedad del suelo depende del nivel de hidrofobicidad inicial, por lo que suelos bajo usos que determinan mayor hidrofobicidad (*Eucalyptus sp.*), tienen mayores tasas de aumento de esta propiedad al secarse. El desarrollo de hidrofobicidad impacta sobre la capacidad de retención de agua, teniendo los suelos hidrofóbicos una menor capacidad de retención a cualquier potencial de matriz. Este efecto se acentúa cuando se los evalúa a niveles de succión superiores. Los suelos hidrofóbicos pierden, en términos relativos, mayor capacidad de retención de agua a niveles energéticos elevados, en comparación con los no hidrofóbicos.

2.8. Referencias

- 1) Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*. 2000;51(1-4):33-65.
- 2) Doerr SH, Thomas AD. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*. 2000;231-232:134-47.
- 3) Ritsema CJ, Dekker LW. *Soil Water Repellency: Occurrence, Consequences, and Amelioration*. Wageningen, The Netherlands: Elsevier; 2003. 359 p.
- 4) Jaramillo DF, Dekker LW, Ritsema CJ, Hendrickx JMH. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology*. 2000;231-232:105-11.

- 5) Rodríguez-Alleres M, Benito E, de Blas E. Extent and persistence of water repellency in north-western Spanish soils. *Hydrological Processes*. 2007;21(17):2291-9.
- 6) Vogelmann ES, Reichert JM, Reinert DJ, Mentges MI, Vieira DA, de Barros CAP, et al. Water repellency in soils of humid subtropical climate of Rio Grande do Sul, Brazil. *Soil and Tillage Research*. 2010;110(1):126-33.
- 7) Butzen V, Seeger M, Marruedo A, de Jonge L, Wengel R, Ries JB, et al. Water repellency under coniferous and deciduous forest — Experimental assessment and impact on overland flow. *Catena*. 2015;133:255-65.
- 8) Cerdà A, Doerr SH. Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils. *Hydrological Processes*. 2007;21(17):2325-36.
- 9) Leighton-Boyce G, Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. 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*. 2007;21(17):2337-45.
- 10) Ritsema CJ, Dekker LW, Nieber JL, Steenhuis TS. Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*. 1998;34(4):555-67.
- 11) Dekker LW, Ritsema CJ. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology*. 2000;231-232:148-64.
- 12) Ritsema CJ, Dekker LW. Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *Journal of Hydrology*. 2000;231-232:308-19.
- 13) Wessel AT. 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*. 1988;13(6):555-61.

- 14) Zavala LM, González FA, Jordán A. Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain. *Geoderma*. 2009;152(3-4):361-74.
- 15) Mirbabaei SM, Shahrestani MS, Zolfaghari A, Abkenar KT. Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran. *Catena*. 2013;108:26-34.
- 16) Letey J. Causes and consequences of fire-induced soil water repellency. *Hydrological Processes*. 2001;15(15):2867-75.
- 17) Roy JL, McGill WB. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Science*. 2002;167(2):83-97.
- 18) Watson CL, Letey J. Indices for Characterizing Soil-Water Repellency Based upon Contact Angle-Surface Tension Relationships¹. *Soil Science Society of America Journal*. 1970;34(6):841-4.
- 19) Lozano E, Jiménez-Pinilla P, Mataix-Solera J, Arcenegui V, Bárcenas GM, González-Pérez JA, et al. Biological and chemical factors controlling the patchy distribution of soil water repellency among plant species in a Mediterranean semiarid forest. *Geoderma*. 2013;207-208:212-20.
- 20) Mao J, Nierop KGJ, Rietkerk M, Sinninghe Damsté JS, Dekker SC. The influence of vegetation on soil water repellency-markers and soil hydrophobicity. *Science of The Total Environment*. 2016;566-567:608-20.
- 21) Teramura AH. Relationships between Stand Age and Water Repellency of Chaparral Soils. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 1980;107(1):42-6.
- 22) Wallis M, Horne D, Palmer A. Water repellency in a New Zealand development sequence of yellow brown sands. *Soil Research*. 1993;31(5):641.
- 23) Horne DJ, McIntosh JC. Hydrophobic compounds in sands in New Zealand—extraction, characterisation and proposed mechanisms for repellency expression. *Journal of Hydrology*. 2000;231-232:35-46.

- 24) Woche SK, Goebel M-O, Kirkham MB, Horton R, Van der Ploeg RR, Bachmann J. Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management. *European Journal of Soil Science*. 2005;56(2):239-51.
- 25) Verheijen FGA, Cammeraat LH. The association between three dominant shrub species and water repellent soils along a range of soil moisture contents in semi-arid Spain. *Hydrological Processes*. 2007;21(17):2310-6.
- 26) Mataix-Solera J, Arcenegui V, Guerrero C, Mayoral AM, Morales J, González J, et al. Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid Mediterranean environment. *Hydrological Processes*. 2007;21(17):2300-9.
- 27) Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. Soil hydrophobicity variations with depth and particle size fraction in burned and unburned *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* forest terrain in the hueda Basin, Portugal. *Catena*. 1996;27:25-47.
- 28) Doerr SH. On standardizing the 'Water Drop Penetration Time' and the 'Molarity of an Ethanol Droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1998;23(7):663-8.
- 29) Scott DF. 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*. 2000;231-232:87-104.
- 30) Hernández J, del Pino A, Califra A. *Eucalyptus* and *Pine* Stand Spacing-Density Study and its implications for Carbon Sequestration Processes. Final Report. [Datos sin publicar]. Uruguay, UDELAR, Facultad de Agronomía; 2013.
- 31) Cambroner YC, Maia CMB de F, Dedeczek RA, Hansel FA. Influência da concentração de extratos hidrofóbicos na repelência à água em solos arenosos. *Pesquisa Florestal Brasileira*. 2011;31(65):1-8.

- 32) Wahl NA. Variability of water repellency in sandy forest soils under broadleaves and conifers in north-western Jutland/Denmark. *Soil and Water Research*. 2008;3(Special Issue No. 1):S155-64.
- 33) Keizer JJ, Doerr SH, Malvar MC, Ferreira AJD, Pereira VMFG. Temporal and spatial variations in topsoil water repellency throughout a crop-rotation cycle on sandy soil in north-central Portugal. *Hydrological Processes*. 2007;21(17):2317-24.
- 34) Soil Survey Staff. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. Washington DC, USA: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service; 2014.
- 35) García-Préchac F, Kaplán A. Evaluación de un método para determinar densidad aparente, macroporosidad y microporosidad del suelo [Agr. Eng. Thesis]. [Montevideo, Uruguay]: Facultad de Agronomía, Universidad de la República; 1974.
- 36) Klute A. Water retention: laboratory methods. En: Klute, A (Ed), *Methods of Soil Analysis Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. Agronomy Monograph No. 9; 1986. p. 635–662.
- 37) Mebius L. A rapid method for the determination of organic carbon in soil. *Analytica Chimica Acta*. 1960;22:120-4.
- 38) Agresti A. *An introduction to categorical data analysis*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience; 2007. 372 p. (Wiley series in probability and mathematical statistics).
- 39) Bisdom EBA, Dekker LW, Schoute JFTh. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*. 1993;56:105-18.
- 40) R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria [Internet]. 2018. Disponible en: <http://www.R-project.org/>

- 41) Kawamoto K, Moldrup P, Komatsu T, de Jonge LW, Oda M. Water Repellency of Aggregate Size Fractions of a Volcanic Ash Soil. *Soil Science Society of America Journal*. 2007;71(6):1658-66.
- 42) Hallett PD. A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency – a review. *Soil and Water Research*. 2008;3(Special Issue No. 1):S21-9.
- 43) Vogelmann ES, Reichert JM, Prevedello J, Awe GO, Mataix-Solera J. Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? *Catena*. 2013;110:24-31.
- 44) Mainwaring K, Hallin IL, Douglas P, Doerr SH, Morley CP. The role of naturally occurring organic compounds in causing soil water repellency: Soil water repellency from organic compounds. *European Journal of Soil Science*. 2013;64(5):667-80.

3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados obtenidos en este trabajo son concluyentes sobre varias de las hipótesis planteadas y evidencian la importancia del estudio del impacto en las propiedades del suelo de la sustitución formaciones de pasturas nativas por sistemas forestales.

El cambio de uso del suelo de pasturas nativas a cobertura forestal determinó un aumento de la hidrofobicidad en superficie, la cual resultó 6.4, 11.6 veces y 31.2 veces superior bajo la nueva cobertura, a 10, 33 y 100 kPa respectivamente. Algunos autores afirman que la vegetación es el principal factor determinante de la repelencia al agua en los suelos (Horne y McIntosh 2000, Rodríguez-Alleres et al. 2007, Lozano et al. 2013). Las especies arbóreas perennes y, particularmente aquellas que generan una importante cantidad de resinas, ceras y aceites aromáticos, como son las pertenecientes al género *Pinus sp.* y *Eucalyptus sp.* (Doerr et al. 1996, 2000), han sido asociadas al desarrollo de repelencia al agua en los suelos (Doerr et al. 2000, Verheijen y Cammeraat 2007). Existen también mecanismos indirectos mediante los cuales este tipo de vegetación forestal podría intensificar el proceso de hidrofobización del suelo. Uno de ellos sería la promoción del desarrollo de biomasa fúngica, fuertemente asociada a la producción de sustancias hidrofóbicas, debido a la acidificación del suelo y la producción de materia orgánica de difícil descomposición (Doerr et al. 2000, Rodríguez-Alleres et al. 2007, Vogelmann et al. 2015). Se constata que la sustitución de pasturas nativas por plantaciones forestales logra una tasa de modificación de las propiedades hídricas del suelo de suficiente magnitud para generar cambios identificables en su hidrofobicidad en un período de 14 años.

Algunos autores hipotetizan con una potencial relación funcional entre la hidrofobicidad y la vegetación arbórea (Doerr et al. 2000, Olorunfemi et al. 2014). Las características del sistema radicular de la vegetación forestal y el desarrollo de hidrofobicidad generan flujos preferenciales para el movimiento del agua en el perfil del suelo. En este nuevo escenario, las raíces de los árboles puedan utilizar agua que está a profundidades mayores y que no está disponible para plantas que desarrollan

sus sistemas radiculares de forma más superficial (Scott, 2000). Estas últimas también se verían perjudicadas por una menor capacidad de retención de agua de las zonas más superficiales del perfil del suelo, por la promoción de su conservación en profundidad debido a flujos preferenciales y a la propia disminución del potencial de matriz en superficie (Doerr et al., 2000), promoviéndose una desecación parcial de la superficie del suelo que acentuaría los procesos anteriores.

Al analizar el efecto de la especie forestal, se determinó que la hidrofobicidad desarrollada bajo coberturas de *Eucalyptus grandis* fue superior a la desarrollada bajo *Pinus taeda*, lo que concuerda con trabajos anteriores que fueron desarrollados en situaciones climáticas distintas a una condición templado húmeda y/o en sistemas con coberturas forestales por períodos de tiempo muy superiores a los que ocurren en Uruguay (Doerr et al. 1996, Doerr 1998, Scott 2000, Rodríguez-Alleres et al. 2007, Zavala et al. 2009). Particularmente, la repelencia al agua bajo cobertura de *Eucalyptus grandis* fue 4.1 veces superior que bajo *Pinus taeda* a 100 kPa de succión, mientras que mostró una tendencia (diferencias no significativas) a 10 y 33 kPa de succión, siendo 1.65 y 2 veces superior bajo *Eucalyptus grandis* en comparación con *Pinus taeda* a esas succiones respectivamente.

Rodríguez-Alleres et al. (2007) encontraron niveles de hidrofobicidad mayores bajo coberturas de *Eucalyptus globulus* en comparación con la desarrollada bajo *Pinus pinaster* en el noroeste de España. Scott (2000) llegó a resultados similares comparando suelos bajo coberturas de *Eucalyptus sp.*, *Pinus sp.* y *Acacia sp.* en Sudáfrica, así como Zavala et al. (2009) estudiando severidad y persistencia de la hidrofobicidad en suelos del sureste de España. Doerr et al. (1996) y Doerr (1998) plantean que los mayores niveles de hidrofobicidad en suelos bajo cobertura de *Eucalyptus sp.* se deberían a que el tipo de materia orgánica aportada por la cobertura de *Eucalyptus sp.* es más hidrofóbica y/o generadas en cantidades mayores. Esto último se alinea con lo planteado por Hernández et al. (2013), según los cuales el stock promedio acumulado anual de mantillo debajo de *Eucalyptus grandis* es mayor que el acumulado bajo *Pinus taeda*. Una hipótesis adicional es que las mayores tasas transpiratorias de *Eucalyptus sp.* generarían un mayor secado del suelo en períodos

de déficit hídricos y la mayor precipitación de compuestos orgánicos en torno a las partículas del suelo (Doerr et al. 1996, Rodríguez-Alleres et al. 2007).

Existe consenso en que el fenómeno de hidrofobicidad es causado por compuestos orgánicos que recubren a las partículas del suelo u ocupan parte de su porosidad, disminuyendo la atracción por el agua de toda la matriz (Doerr et al., 2000). Sin embargo, los trabajos que han buscado relacionar la hidrofobicidad con el contenido de materia orgánica del suelo han tenido resultados dispares. Algunos autores como Mataix-Solera y Doerr (2004), Varela et al. (2005), Kawamoto et al. (2007), Verheijen y Cammeraat (2007), Zavala et al. (2009), Mirbabaei et al. (2013), Lozano et al. (2013) y Mao et al. (2016) encontraron correlaciones positivas entre la repelencia al agua de los suelos y su contenido de materia orgánica. Sin embargo, otros autores como Teramura (1980) y Wallis et al. (1993) no encontraron asociación entre estas variables. En este trabajo se encontró una asociación positiva entre las variables que caracterizaron la hidrofobicidad y contenido de carbono orgánico aunque las correlaciones no resultaron elevadas. Esto indicaría que es más importante en términos relativos la calidad de la materia orgánica (tipo de compuestos carbonados) que su cantidad, como variable explicativa de los cambios ocurridos en la hidrofobicidad al modificarse el uso del suelo de pastoril a forestal. Esta hipótesis ha sido planteada en algunos trabajos previos como Wallis et al. (1993) y Woche et al. (2005). A su vez, la presencia de sustancias lipídicas sería particular responsable de la determinación de la severidad y persistencia de la repelencia al agua (Horne y McIntosh 2000, Lozano et al. 2013).

La densidad de plantación no resultó ser un factor significativo en la determinación de la hidrofobicidad del suelo. Evidencias planteadas Hernández et al. (2013) sostienen que no existen variaciones en la cantidad de materia orgánica aportada por la cobertura forestal asociadas al cambio de la densidad de plantación en los rangos evaluados en este trabajo, lo cual se explicaría fundamentalmente por una compensación en la biomasa aérea al disminuir la densidad de plantación, desarrollándose árboles de mayor tamaño de copa. Entonces, la cantidad de materia orgánica capaz de aportar compuestos hidrofóbicos al suelo sería similar entre

bosques con densidades de plantación diferentes, lo que es coherente con la ausencia de diferencias identificadas en la hidrofobicidad al comparar distintos tratamientos de densidad de plantación forestal. A su vez, aunque las cantidades de materia orgánica fueran distintas entre los diferentes tratamientos de densidad, el efecto relativo del stock de C del suelo es menor que el efecto del tipo de compuestos carbonados sobre el desarrollo de hidrofobicidad, tal como fue discutido previamente (Horne y McIntosh 2000, Woche et al. 2005, Lozano et al. 2013).

El potencial de matriz o estado energético del agua en el suelo tiene un claro efecto sobre la hidrofobicidad, la cual aumenta al secarse el suelo. Otros trabajos coinciden en que la hidrofobicidad varía con el contenido de agua del suelo, haciéndose más pronunciada cuando el suelo está seco, mientras que desciende o desaparece completamente después de precipitación intensa o durante periodos extendidos de alto contenido de agua en el suelo (Kawamoto et al. 2007, Vogelmann et al. 2013a, Butzen et al. 2015). Keizer et al. (2007) sostienen que el contenido de humedad del suelo es el principal factor de variación espacio-temporal de la hidrofobicidad. Debido a esto, Scott (2000) plantea la inconveniencia de evaluar la hidrofobicidad de un suelo a campo sin elementos para juzgar la evolución de esta propiedad en función del contenido de humedad en ese sistema en particular. Algunos autores sostienen que existe un contenido de humedad de equilibrio para cada suelo por encima del cual pierde su carácter hidrofóbico, siendo este valor progresivamente mayor ante aumentos del contenido de materia orgánica (Doerr y Thomas 2000, Vogelmann et al. 2013b, Butzen et al. 2015).

Los cambios que se evidencian en el grado de hidrofobicidad del suelo en función del contenido de humedad del mismo se deben a procesos de reorientación de sustancias anfipáticas en torno a las partículas del suelo (Kleber et al. 2007, Diehl 2013, Mainwaring et al. 2013). Un material mantiene su carácter repelente al agua mientras que la capa orgánica que lo cubre, compuesta fundamentalmente por moléculas anfipáticas, se mantiene inalterada (Mainwaring et al., 2013). Cuando el suelo está seco, estas sustancias se orientan con sus extremos polares hacia las partículas del suelo, las cuales tienen carga neta negativa. Al incrementarse el

contenido de agua ocurre un aumento de la atracción de estos extremos polares por la solución del suelo y su progresiva reorientación, lo que debilita progresivamente la atracción entre éstos y la matriz del suelo, hasta que se alcanza un contenido de humedad de equilibrio en el cual el proceso de reorientación es de una magnitud tal que se alcanza una situación de no repelencia (Doerr et al., 2000). A su vez, cuando el contenido de humedad del suelo es alto las moléculas hidrofóbicas tienden a agregarse para reducir el contacto de los extremos apolares con el medio polar que las rodea, reduciendo su contacto con las partículas minerales del suelo y, por lo tanto, la hidrofobicidad de toda la matriz (Rezus y Bakker, 2007). Por el contrario, cuando el suelo se seca los films de agua que recubren sus partículas se hacen sucesivamente más delgados y las succiones de matriz superiores. Al suceder esto, las moléculas hidrofóbicas acompañan el acercamiento del agua hacia las partículas del suelo y tienden a envolverlas. Cuando la humedad alcanza niveles muy bajos, los extremos polares de estas moléculas tienden a ser atraídos por las partículas del suelo, mientras que sus extremos apolares e hidrofóbicos quedan expuestos hacia el espacio poroso (Mataix-Solera et al., 2007), reestableciéndose la repelencia al agua de la matriz.

A su vez, se identificó una asociación negativa entre la hidrofobicidad y la capacidad de retención de agua del suelo a cada potencial de matriz, la cual se intensifica al analizarla a niveles de succión más elevados. Esto se alinea con los mecanismos físico-químicos planteados anteriormente. La progresiva reorientación de moléculas anfipáticas en torno a las partículas del suelo a medida que aumenta el nivel de succión y la exposición de sus colas apolares hacia la solución, disminuyen su capacidad de atraer eléctricamente moléculas de agua, modificando el potencial de matriz del suelo desde sus bases físico-químicas. Este proceso explica la progresiva pérdida de capacidad de retención de agua de un suelo hidrofóbico comparado con uno no hidrofóbico cuando ambos se secan, siendo mayor la reorientación de compuestos hidrobobizantes en el primero de los casos, aumentando la diferencia entre sus capacidades de retención de agua a medida que se los evalúa a succiones más elevadas. Estos mecanismos también explican la existencia de un efecto

significativo de la especie forestal sobre la tasa de cambio de la hidrofobicidad. Las coberturas que aportan una mayor cantidad de compuestos hidrofóbicos al suelo (*Eucalyptus grandis*) tienen mayor capacidad de incremento de la hidrofobicidad por reorientación de los mismos ante disminuciones del contenido de humedad que otros tipos de cobertura (*Pinus taeda*).

3.1.COMENTARIOS GENERALES

Debido a la dificultad de descomposición de los restos forestales, y la dinámica de la distribución de la materia orgánica en suelos bajo cobertura forestal, estas sustancias tienden a acumularse en la superficie del suelo (Rodríguez-Alleres et al., 2007). Los cambios identificados en las propiedades hídricas de los suelos asociados a la modificación de su uso desde pasturas nativas a coberturas forestales fueron medidos exclusivamente en un estrato de suelo correspondiente a los 3 cm superiores del suelo mineral, buscando caracterizar el comportamiento de la interfase mantillo-suelo mineral. Debido a esto resulta fundamental comprobar en futuros trabajos la eventual existencia de impactos en estas propiedades en profundidad ante cambios de uso similares. Otros elementos que deberían ser investigados en futuros trabajos son las consecuencias de la ocurrencia de este fenómeno, principalmente en relación a su impacto hidrológico como eventual modificador de la dinámica de la infiltración, así como de la erodabilidad del suelo como consecuencia de cambios en la relación infiltración/escurrimiento.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Achtenhagen J, Goebel MO, Miltner A, Woche SK, Kästner M. 2015. Bacterial impact on the wetting properties of soil minerals. *Biogeochemistry*, 122(2-3): 269-280.
- Adamson AW, Gast AP. 1997. *Physical chemistry of surfaces*. NY, USA, Wiley Interscience. 794 p.
- Arcenegui V, Mataix-Solera J, Guerrero C, Zornoza R, Mayoral AM, Morales J. 2007. Factors controlling the water repellency induced by fire in calcareous Mediterranean forest soils. *European Journal of Soil Science*, 58(6): 1254-1259.
- Baumgarten T, Sperling S, Seifert J, von Bergen M, Steiniger F, Wick LY, Heipieper HJ. 2012. Membrane Vesicle Formation as a Multiple-Stress Response Mechanism Enhances *Pseudomonas putida* DOT-T1E Cell Surface Hydrophobicity and Biofilm Formation. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(17): 6217-6224.
- Bisdorn EBA, Dekker LW, Schouthe JFTh. 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 56: 105-118.
- Blanco-Canqui H. 2011. Does no-till farming induce water repellency to soils?: No-till and soil water repellency. *Soil Use and Management*, 27(1): 2-9.
- Blanco-Canqui H, Lal R. 2009. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma*, 149(1-2): 171-180.
- Blanco-Canqui H, Mikha MM, Benjamin JG, Stone LR, Schlegel AJ, Lyon DJ, Vigil MF, Stahlman PW. 2009. Regional Study of No-Till Impacts on Near-Surface Aggregate Properties that Influence Soil Erodibility. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4): 1361-1368.

- Bodí MB, Muñoz-Santa I, Armero C, Doerr SH, Mataix-Solera J, Cerdà A. 2013. Spatial and temporal variations of water repellency and probability of its occurrence in calcareous Mediterranean rangeland soils affected by fires. *Catena*, 108: 14-25.
- Bughici T, Wallach R. 2016. Formation of soil–water repellency in olive orchards and its influence on infiltration pattern. *Geoderma*, 262: 1-11..
- Burguet M, Taguas EV, Cerdà A, Gómez JA. 2016. Soil water repellency assessment in olive groves in Southern and Eastern Spain. *Catena*, 147: 187-195.
- Butzen V, Seeger M, Marruedo A, de Jonge L, Wengel R, Ries JB, Casper MC. 2015. Water repellency under coniferous and deciduous forest — Experimental assessment and impact on overland flow. *Catena*, 133: 255-265.
- Cambronero YC, Maia CMB de F, Dedecek RA, Hansel FA. 2011. Influência da concentração de extratos hidrofóbicos na repelência à água em solos arenosos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(65): 1-8.
- Capriel P, Beck T, Borchert H, Gronholz J, Zachmann G. 1995. Hydrophobicity of the organic matter in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(11): 1453-1458.
- Cerdà A, Doerr SH. 2007. Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils. *Hydrological Processes*, 21(17): 2325-2336.
- Chan KY. 1992. Development of seasonal water repellence under direct drilling. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1): 326-329.
- Crockford H, Topalidis S, Richardson DP. 1991. Water repellency in a dry sclerophyll eucalypt forest — measurements and processes. *Hydrological Processes*, 5(4): 405-420.

- Dann JR. 1970. Forces Involved in the Adhesive Process. Critical Surface Tensions of Polymeric Solids as Determined with Polar Liquids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 82(2): 302-320.
- De Blas E, Almendros G, Sanz J. 2013. Molecular characterization of lipid fractions from extremely water-repellent pine and eucalyptus forest soils. *Geoderma*, 206: 75-84.
- De Jonge LW, Jacobsen OH, Moldrup P. 1999. Soil Water Repellency: Effects of Water Content, Temperature, and Particle Size. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 437-442.
- DeBano LF. 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology*, 231-232: 195-206.
- DeBano LF, Savage SM, Hamilton DA. 1976. The Transfer of Heat and Hydrophobic Substances During Burning. *Soil Science Society of America Journal*, 40(5): 779-782.
- DeBano LF, Krammes JS. 1966. Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *Hydrological Sciences Journal*, 11(2): 14-19.
- Dechesne A, Pallud C, Grundmann GL. 2007. Spatial distribution of bacteria at the microscale in soil. En: Franklin, RB; Mills, AL (eds.). *The spatial distribution of microbes in the environment*. Dordrecht, The Netherlands, Springer. p. 87-107.
- Dekker LW, Doerr SH, Oostindie K, Ziogas AK, Ritsema CJ. 2001. Water Repellency and Critical Soil Water Content in a Dune Sand. *Soil Science Society of America Journal*, 65(6): 1667-1674.
- Dekker LW, Ritsema CJ. 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology*, 231-232: 148-164.

- Dekker LW, Ritsema CJ. 1996. Preferential Flow Paths in a Water Repellent Clay Soil with Grass Cover. *Water Resources Research*, 32(5): 1239-1249.
- Dekker LW, Ritsema CJ. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30(9): 2507-2517.
- Diehl D. 2013. Soil water repellency: Dynamics of heterogeneous surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 432: 8-18.
- Dlapa P, Simkovic I, Doerr SH, Kanka R, Mataix-Solera J. 2008. Application of Thermal Analysis to Elucidate Water-Repellency Changes in Heated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1): 1-10.
- Doerr SH, Shakesby RA, Dekker LW, Ritsema CJ. 2006. Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in a humid temperate climate. *European Journal of Soil Science*, 57(5): 741-754.
- Doerr SH, Llewellyn CT, Douglas P, Morley CP, Mainwaring KA, Haskins C, Johnsey L, Ritsema CJ, Stagnitti F, Allinson G, Ferreira D, Keizer JJ, Ziogas AK, Diamantis J. 2005. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different origin. *Australian Journal of Soil Research*, 43(3): 225-237.
- Doerr SH, Blake WH, Shakesby RA, Stagnitti F, Vuurens SH, Humphreys GS, Wallbrink P. 2004. Heating effects on water repellency in Australian eucalypt forest soils and their value in estimating wildfire soil temperatures. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2): 157-163.
- Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51(1-4): 33-65.

- Doerr SH, Thomas AD. 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 SH. 1998. On standardizing the 'Water Drop Penetration Time' and the 'Molarity of an Ethanol Droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(7): 663-668.
- Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. 1996. Soil hydrophobicity variations with depth and particle size fraction in burned and unburned *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* forest terrain in the hgueda Basin, Portugal. *Catena*, 27: 25-47.
- Feeney DS, Hallett PD, Rodger S, Bengough AG, White NA, Young IM. 2006. Impact of fungal and bacterial biocides on microbial induced water repellency in arable soil. *Geoderma*, 135: 72-80.
- Finley CD, Glenn NF. 2010. Fire and vegetation type effects on soil hydrophobicity and infiltration in the sagebrush-steppe: II. Hyperspectral analysis. *Journal of Arid Environments*, 74(6): 660-666.
- Giovannini G, Lucchesi S. 1983. Effect of Fire on Hydrophobic and Cementing Substances of Soil aggregates. *Soil Science*, 136(4): 231-236.
- González-Peñaloza FA, Cerdà A, Zavala LM, Jordán A, Giménez-Morera A, Arcenegui V. 2012. Do conservative agriculture practices increase soil water repellency? A case study in citrus-cropped soils. *Soil and Tillage Research*, 124: 233-239.
- Hallett PD. 2008. A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency – a review. *Soil and Water Research*, 3(Special Issue No. 1): S21-S29.

- Hallett PD, Nunan N, Douglas JT, Young IM. 2004. Millimeter-Scale Spatial Variability in Soil Water Sorptivity. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2): 352.
- Hallett PD, Ritz K, Wheatley RE. 2001a. Microbial derived water repellency in golf course soil. *International Turfgrass Society Research Journal*, 9: 518-524.
- Hallett PD, Baumgartl T, Young IM. 2001b. Subcritical Water Repellency of Aggregates from a Range of Soil Management Practices. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1): 184-190.
- Harper R, Gilkes R. 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.
- Hernández J, del Pino A, Califra A. 2013. Eucalyptus and Pine Stand Spacing-Density Study and its implications for Carbon Sequestration Processes. Final Report. [Datos sin publicar]. Uruguay, UDELAR, Facultad de Agronomía.
- Hillel D. 1998. *Environmental soil physics*. CA, USA, Academic Press. 801 p.
- Horne DJ, McIntosh JC. 2000. Hydrophobic compounds in sands in New Zealand—extraction, characterisation and proposed mechanisms for repellency expression. *Journal of Hydrology*, 231-232: 35-46.
- Hubbert KR, Preisler HK, Wohlgemuth PM, Graham RC, Narog MG. 2006. Prescribed burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA. *Geoderma*, 130(3-4): 284-298.
- Huffman EL, MacDonald LH, Stednick JD. 2001. Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range. *Hydrological Processes*, 15(15): 2877-2892.

- Hurraß J, Schaumann GE. 2006. Properties of soil organic matter and aqueous extracts of actually water repellent and wettable soil samples. *Geoderma*, 132(1-2): 222-239.
- Jaramillo DFJ. 2006. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 30(115): 215-232.
- Jaramillo DF, Dekker LW, Ritsema CJ, Hendrickx JMH. 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology*, 231-232: 105-111.
- Kawamoto K, Moldrup P, Komatsu T, de Jonge LW, Oda M. 2007. Water Repellency of Aggregate Size Fractions of a Volcanic Ash Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6): 1658-1666.
- Keizer JJ, Doerr SH, Malvar MC, Ferreira AJD, Pereira VMFG. 2007. Temporal and spatial variations in topsoil water repellency throughout a crop-rotation cycle on sandy soil in north-central Portugal. *Hydrological Processes*, 21(17): 2317-2324.
- King PM. 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(3): 275-285.
- Kleber M, Sollins P, Sutton R. 2007. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry*, 85(1): 9-24.
- Leighton-Boyce G, Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. 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(17): 2337-2345.

- Letey J. 2001. Causes and consequences of fire-induced soil water repellency. *Hydrological Processes*, 15(15): 2867-2875.
- Letey J, Carrillo MLK, Pang XP. 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology*, 231-232: 61-65.
- Letey J, Welch N, Pelishek E, Osborn J. 1962. Effect of wetting agents on irrigation of water repellent soils. *California Agriculture*, 16(12): 12-13.
- Lin C-Y, Chou W-C, Tsai J-S, Lin W-T. 2006. Water repellency of Casuarina windbreaks (*Casuarina equisetifolia* Forst.) caused by fungi in central Taiwan. *Ecological Engineering*, 26(3): 283-292.
- Linder MB, Szilvay GR, Nakari-Setälä T, Penttilä ME. 2005. Hydrophobins: the protein-amphiphiles of filamentous fungi. *FEMS Microbiology Reviews*, 29(5): 877-896.
- Lozano E, Jiménez-Pinilla P, Mataix-Solera J, Arcenegui V, Bárcenas GM, González-Pérez JA, García-Orenes F, Torres MP, Mataix-Beneyto J. 2013. Biological and chemical factors controlling the patchy distribution of soil water repellency among plant species in a Mediterranean semiarid forest. *Geoderma*, 207-208: 212-220.
- Madsen MD, Zvirzdin DL, Petersen SL, Hopkins BG, Roundy BA, Chandler DG. 2011. Soil Water Repellency within a Burned Piñon–Juniper Woodland: Spatial Distribution, Severity, and Ecohydrologic Implications. *Soil Science Society of America Journal*, 75(4): 1543-1553.
- Mainwaring K, Hallin IL, Douglas P, Doerr SH, Morley CP. 2013. The role of naturally occurring organic compounds in causing soil water repellency: Soil water repellency from organic compounds. *European Journal of Soil Science*, 64(5): 667-680.

- Mao J, Nierop KGJ, Rietkerk M, Sinninghe Damsté JS, Dekker SC. 2016. The influence of vegetation on soil water repellency-markers and soil hydrophobicity. *Science of The Total Environment*, 566-567: 608-620.
- Ma'shum M, Tate ME, Jones GP, Oades JM. 1988. Extraction and characterization of water-repellent materials from Australian soils. *Journal of Soil Science*, 39(1): 99-110.
- Ma'shum M, Farmer V. 1985. Origin and assessment of water repellency of a sandy South Australian soil. *Australian Journal of Soil Research*, 23(4): 623-626.
- Mataix-Solera J, Arcenegui V, Tessler N, Zornoza R, Wittenberg L, Martínez C, Caselles P, Pérez-Bejarano A, Malkinson D, Jordán MM. 2013. Soil properties as key factors controlling water repellency in fire-affected areas: Evidences from burned sites in Spain and Israel. *Catena*, 108: 6-13.
- Mataix-Solera J, Cerdà A, Arcenegui V, Jordán A, Zavala LM. 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews*, 109(1-2): 44-60.
- Mataix-Solera J, Arcenegui V, Guerrero C, Mayoral AM, Morales J, González J, García-Orenes F, Gómez I. 2007. Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid Mediterranean environment. *Hydrological Processes*, 21(17): 2300-2309.
- Mataix-Solera J, Doerr SH. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma*, 118(1-2): 77-88.
- Mcghie D, Posner A. 1980. Water repellence of a heavy textured Western Australian surface soil. *Australian Journal of Soil Research*, 18(3): 309-323.
- Mirbabaei SM, Shahrestani MS, Zolfaghari A, Abkenar KT. 2013. Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran. *Catena*, 108: 26-34.

- Nunan N, Wu K, Young IM, Crawford JW, Ritz K. 2002. In situ Spatial Patterns of Soil Bacterial Populations, Mapped at Multiple Scales, in an Arable Soil. *Microbial Ecology*, 44(4): 296-305.
- Olorunfemi IE, Ogunrinde TA, Fasinmirin JT. 2014. Soil Hydrophobicity: An Overview. *Journal of Scientific Research and Reports*, 3(8): 1003-1037.
- Pedrós Marí B. 2003. Clonación y caracterización de una hidrofobina de clase II (CaHPB) de *Candida albicans*. Doctoral Thesis. Valencia, España, Universitat de València/Estudi General. 232 p. .
- Pikul JL, Chilom G, Rice J, Eynard A, Schumacher TE, Nichols K, Johnson JMF, Wright S, Caesar T, Ellsbury M. 2009. Organic Matter and Water Stability of Field Aggregates Affected by Tillage in South Dakota. *Soil Science Society of America Journal*, 73(1): 197-206.
- Rezus YLA, Bakker HJ. 2007. Observation of Immobilized Water Molecules around Hydrophobic Groups. *Physical Review Letters*, 99(14): 1-4.
- Richardson JL, Hole FD. 1978. Influence of Vegetation on Water Repellency in Selected Western Wisconsin Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3): 465-467.
- Rillig MC. 2005. A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency? *Pedobiologia*, 49(5): 395-399.
- Ritsema CJ, Dekker LW. 2003. *Soil Water Repellency: Occurrence, Consequences, and Amelioration*. Wageningen, The Netherlands, Elsevier. 359 p.
- Ritsema CJ, Dekker LW. 2000. Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *Journal of Hydrology*, 231-232: 308-319.

- Ritsema CJ, Dekker LW, Nieber JL, Steenhuis TS. 1998. Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*, 34(4): 555-567.
- Rodríguez Jelós J. 2008. Caracterización del proceso de hidrofobicidad en suelos afectados a la forestación con *Eucalyptus* sp. y *Pinus* sp. Primera aproximación. Thesis. Montevideo, Uruguay, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. .
- Rodríguez-Alleres M, Benito E, de Blas E. 2007. Extent and persistence of water repellency in north-western Spanish soils. *Hydrological Processes*, 21(17): 2291-2299.
- Roper MM. 2005. Managing soils to enhance the potential for bioremediation of water repellency. *Australian Journal of Soil Research*, 43(7): 803-810.
- Roy JL, McGill WB. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Science*, 167(2): 83-97.
- Schaumann GE, Braun B, Kirchner D, Rotard W, Szewzyk U, Grohmann E. 2007. Influence of biofilms on the water repellency of urban soil samples. *Hydrological Processes*, 21(17): 2276-2284.
- Scott DF. 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.
- Šimon T, Javůrek M, Mikanová O, Vach M. 2009. The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity. *Soil and Tillage Research*, 105(1): 44-48.
- SPF. 2019. Uruguay Forestal - Plantaciones [En línea]. 28 mayo 2019. <http://www.spf.com.uy/uruguay-forestal-plantaciones>.

- Teramura AH. 1980. Relationships between Stand Age and Water Repellency of Chaparral Soils. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 107(1): 42-46.
- Thwaites LA, de Rooij GH, Salzman S, Allinson G, Stagnitti F, Carr R, Versace V, Struck S, March T. 2006. Near-surface distributions of soil water and water repellency under three effluent irrigation schemes in a blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation. *Agricultural Water Management*, 86(1-2): 212-219.
- Tschapek M. 1984. Criteria for Determining the hydrophilicity-hydrophobicity of Soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 147(2): 137-149.
- Urbanek E, Hallett P, Feeney D, Horn R. 2007. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma*, 140(1-2): 147-155.
- Uruguay. Poder Legislativo. 1988. Ley N° 15.939. Ley Forestal [En línea]. Consultado 5 junio 2019. Disponible en: <https://legislativo.parlamento.gub.uy/temporales/leytemp5329393.htm>
- van der Vegt W, van der Mei HC, Wösten HAB, Wessels JGH, Busscher HJ. 1996. A comparison of the surface activity of the fungal hydrophobin SC3p with those of other proteins. *Biophysical Chemistry*, 57(2-3): 253-260.
- Varela ME, Benito E, de Blas E. 2005. Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain. *Hydrological Processes*, 19(18): 3649-3657.
- Verheijen FGA, Cammeraat LH. 2007. The association between three dominant shrub species and water repellent soils along a range of soil moisture contents in semi-arid Spain. *Hydrological Processes*, 21(17): 2310-2316.
- Vogelmann ES, Prevedello J, Reichert JM. 2015. Origem dos compostos hidrofóbicos e seus efeitos em florestas de Pinus e Eucalyptus. *Ciência Florestal*, 25(4): 1067-1079.

- Vogelmann ES, Reichert JM, Prevedello J, Awe GO, Mataix-Solera J. 2013a. Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? *Catena*, 110: 24-31.
- Vogelmann ES, Reichert JM, Prevedello J, Consensa COB, Oliveira AÉ, Awe GO, Mataix-Solera J. 2013b. Threshold water content beyond which hydrophobic soils become hydrophilic: The role of soil texture and organic matter content. *Geoderma*, 209-210: 177-187.
- Vogelmann ES, Reichert JM, Reinert DJ, Mentges MI, Vieira DA, de Barros CAP, Fasinmirin JT. 2010. Water repellency in soils of humid subtropical climate of Rio Grande do Sul, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 110(1): 126-133.
- Wahl NA. 2008. Variability of water repellency in sandy forest soils under broadleaves and conifers in north-western Jutland/Denmark. *Soil and Water Research*, 3(Special Issue No. 1): S155-S164.
- Wallis M, Horne D, Palmer A. 1993. Water repellency in a New Zealand development sequence of yellow brown sands. *Soil Research*, 31(5): 641.
- Wallis MG, Horne DJ, McAuliffe KW. 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 Agricultural Research*, 33(1): 139-144.
- Wander IW. 1949. An Interpretation of the Cause of Water-repellent Sandy Soils Found in Citrus Groves of Central Florida. *Science*, 110: 299-300.
- Wang XY, Zhao Y, Horn R. 2010. Soil Wettability as Affected by Soil Characteristics and Land Use. *Pedosphere*, 20(1): 43-54.
- Watson CL, Letey J. 1970. Indices for Characterizing Soil-Water Repellency Based upon Contact Angle-Surface Tension Relationships¹. *Soil Science Society of America Journal*, 34(6): 841-844.

- Wessel AT. 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(6): 555-561.
- Willey JM, Wösten HAB. 2000. Surface-active proteins enable microbial aerial hyphae to grow into the air. *Microbiology*, 146(4): 767-773.
- Woche SK, Goebel M-O, Kirkham MB, Horton R, Van der Ploeg RR, Bachmann J. 2005. Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management. *European Journal of Soil Science*, 56(2): 239-251.
- Wösten HAB, de Vocht ML. 2000. Hydrophobins, the fungal coat unravelled. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1469(2): 79-86.
- Zavala LM, González FA, Jordán A. 2009. Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain. *Geoderma*, 152(3-4): 361-374.
- Zisman WA. 1964. Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution. En: Fowkes, FM (ed.). *Contact Angle, Wettability, and Adhesion*. Washington DC, USA, American Chemical Society. p. 1-51.