



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

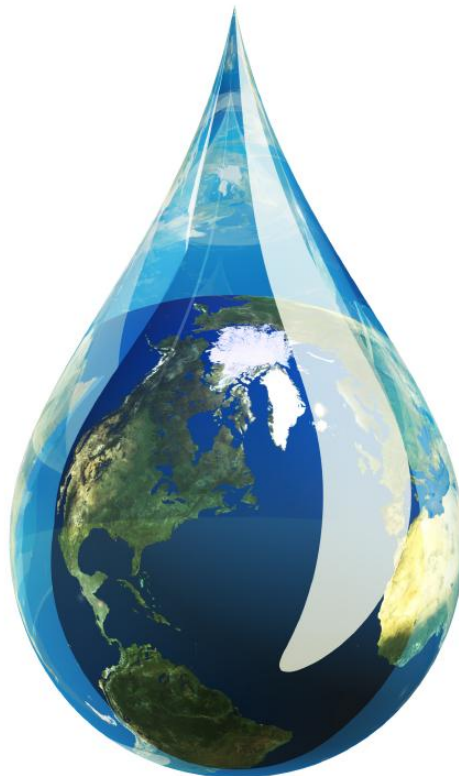
Facultad de Ciencias
Departamento de Ciencias de la Navegación y de la Tierra
Área de Edafología y Química Agrícola

Trabajo Fin de Grado

**Mitigación de la repelencia al agua en suelos quemados
empleando polímeros orgánicos**

**Mitigación da repelencia ó auga en solos queimados
empregando polímeros orgánicos**

**Mitigation of water repellency in burnt soils using organic
polymers**



Autora: Sara de la Torre Vaamonde

Directores: Dr. Marcos Lado Liñares
Dra. Eva Vidal Vázquez

Fecha de defensa: 28 de junio de 2016

ÍNDICE

Resumen / Abstract /Resumo	1-2
1. Presentación	3
2. Objetivos	3
3. Introducción	4-6
4. Material y Métodos	
4.1. Suelos Analizados	7-8
4.2. Análisis de propiedades generales	8
4.2.1. Textura	8
4.2.2. Determinación de pH	9
4.2.3. Determinación del carbono total y contenido en materia orgánica	9
4.3. Análisis de repelencia al agua	9-10
4.4 Métodos estadísticos	11
5. Resultados y Discusión	
5.1. Textura del suelo	12-13
5.2. Niveles de pH	13-14
5.3. Carbono total y contenido en materia orgánica	14-15
5.4. Efecto del fuego sobre la repelencia al agua del suelo	15-17
5.5. Efecto del PAM sobre la repelencia al agua	17-21
6. Conclusiones / Conclusions	22
7. Bibliografía	23-26

RESUMEN

Mediante el presente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado un estudio de los efectos de los incendios en las propiedades físicas de los suelos, considerando fundamentalmente las consecuencias sobre la repelencia al agua, así como algunas propiedades relacionadas con estos parámetros, como la acidez, el contenido en materia orgánica o la textura.

Para mitigar la repelencia al agua en suelos quemados se ha aplicado un polímero orgánico de bajo coste y aplicación sencilla denominado PAM. El resultado de este tratamiento ha sido estudiado en el laboratorio obteniendo resultados positivos tras su aplicación.

El objetivo principal de este estudio ha sido analizar la evolución de la repelencia al agua, tanto en zona control como en zona afectada por un incendio, estableciendo una relación entre los diferentes suelos analizados, con el fin de conocer cómo la repelencia al agua influye en la recuperación del suelo tras sufrir un incendio forestal.

Se analizaron los resultados obtenidos tras la aplicación del polímero orgánico PAM para comprobar su efectividad en la disminución de la repelencia al agua en suelos quemados.

ABSTRACT

Through this Final Project there were studied the effects of fire on the physical properties of soils, mainly considering the consequences on water repellency and some properties related to these parameters, such as acidity, the organic matter content, or texture.

To mitigate the water repellency in burned soils has been applied an organic polymer with low cost and simple application called PAM. The result of this treatment has been studied in the laboratory with positive results after application.

The main objective of this study was to analyze the evolution of water repellency, both control zone and area affected by fire, establishing a relationship between the different soils analyzed, in order to know how the water repellency influences soil recovery after suffering a wildfire.

The results obtained after application of the organic polymer PAM to prove its effectiveness in reducing water repellency in burned soils were analyzed.

RESUMO

Mediante o presente Traballo de Fin de Grao realizouse un estudo dos efectos dos incendios nas propiedades físicas dos solos, considerando fundamentalmente as consecuencias sobre a repelencia ó auga, así como algunhas propiedades

relacionadas con estes parámetros, como a acidez, o contido en materia orgánica ou a textura.

Para mitigar a repelencia ó auga en solos queimados aplicouse un polímero orgánico de baixo custe e aplicación sinxela denominado PAM. O resultado deste tratamento foi estudado no laboratorio obtendo resultados positivos tras a súa aplicación.

O obxectivo principal deste estudo foi analizar a evolución da repelencia ó auga, tanto en zona control como en zona afectada por un incendio, establecendo unha relación entre os diferentes solos analizados, coa fin de coñecer cómo a repelencia ó auga inflúe na recuperación do solo tras sufrir un incendio forestal.

Analizáronse os resultados obtidos tras a aplicación do polímero orgánico PAM para comprobar a súa efectividade na diminución da repelencia ó auga en solos queimados.

1. PRESENTACIÓN

La presentación de este proyecto de investigación sobre “Mitigación de la repelencia al agua en suelos quemados empleando polímeros orgánicos” lleva inevitablemente a explicar de dónde surge, quiénes son los promotores y dentro de dónde se integra.

El departamento de Edafología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de A Coruña (UDC) es el órgano que coordina esta investigación que ha sido realizada en el ámbito universitario trabajando en la propia facultad de Ciencias y en el Centro de Investigación de Ciencias Avanzadas (CICA) y ha sido encaminado por Marcos Lado Liñares y Eva Vidal Vázquez.

Es importante destacar que los objetivos de la investigación se han ido reformulando durante el desarrollo del proyecto, según los resultados que se iban obteniendo.

El periodo de duración de la investigación, como alumna de fin de grado, fue de cinco meses, de febrero a junio de 2016, en los cuales el proceso de trabajo se desarrolló en diferentes fases establecidas desde la metodología de la Investigación.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio ha sido analizar la evolución de la repelencia al agua en suelos afectados por el fuego y la idoneidad de la aplicación de un polímero orgánico (poliacrilamida-PAM) para reducir dicha repelencia.

Para alcanzar este objetivo, se han fijado unos objetivos específicos:

- Comprobar de qué manera influye el fuego sobre las propiedades generales del suelo tales como la textura, el contenido de carbono y el pH.
- Medir la repelencia al agua en varios suelos y de qué manera aumenta o disminuye tras la acción del fuego.
- Analizar el efecto de la humectación sobre suelos quemados y su relación con la repelencia.
- Estudiar la mitigación de la repelencia al agua en suelos quemados mediante la aplicación del polímero orgánico PAM.

3. INTRODUCCIÓN

El fuego es un factor ecológico natural en la Tierra y ha actuado con diferente intensidad desde hace millones de años. En épocas recientes, sin embargo, ha adquirido gran atención debido a las alteraciones que supone en los ecosistemas, además de poner en riesgo propiedades y vidas humanas.

Los cambios que produce el fuego en la vegetación, la micro y macrofauna, los ciclos biogeoquímicos, las propiedades del suelo y los procesos hidrológicos y geomorfológicos, se deben al calentamiento producido por el mismo incendio, pero también a las condiciones ambientales surgidas tras la pérdida de la cubierta vegetal y el recubrimiento con cenizas. Es decir, el paso del fuego transforma súbitamente el aspecto y el funcionamiento del ecosistema allí donde se produce, y deja una herencia que lo afectará durante años de manera muy dinámica y variable dependiendo de múltiples factores (Berenguer., 2012). Uno de los efectos ambientales producidos por el fuego es el de la alteración de las propiedades edáficas, en numerosas ocasiones asociadas a elevadas tasas de erosión, lo que potencia procesos de desertificación.

El suelo es el componente básico de los ecosistemas terrestres. El suelo es una parte fundamental del sistema terrestre donde se producen la mayoría de las transformaciones de la energía y de la materia de los ecosistemas e interviene en el ciclo del agua y de los elementos biogeoquímicos. Uno de los componentes básicos del suelo es el agua. Sin agua se verían impedidas la descomposición de la materia orgánica, algunas formas de meteorización y los procesos edafogenéticos. Además, el agua junto a los nutrientes del suelo forman la solución del suelo, el medio por el cual las raíces de las plantas absorben los nutrientes. La estructura del suelo permite que el agua se infiltre y parte de ella quede retenida en su sistema de poros. Cuando un suelo es afectado por el fuego, su sostenibilidad y recuperación dependerán de las funciones y procesos químicos, físicos y biológicos que ocurran debajo de la capa de hojarasca (Neary et al., 1999; Mataix-Solera y Guerrero, 2007). Tras el fuego, el suelo puede sufrir cambios directos producidos por el calentamiento y la combustión de la materia orgánica, e indirectos como consecuencia de la situación microclimática después de la pérdida de la cubierta vegetal y recubrimiento de las cenizas. Estos cambios dependerán principalmente de la temperatura alcanzada durante el incendio (Neary et al., 1999).

El calentamiento del suelo produce variaciones en algunas de las propiedades físicas y químicas. El pH, normalmente, aumenta, debido al aporte de carbonatos, cationes básicos y óxidos procedentes de las cenizas. El tiempo de recuperación del pH inicial es variado y se considera que es más o menos rápido según el tiempo que las cenizas permanezcan en el suelo (Mataix-Solera y Guerrero, 2007). Este aporte de cenizas también enriquece el suelo con un aumento de nutrientes (Ca, Mg, K, Na, P) (Raison et al., 1985).

Respecto a los cambios en el carbono orgánico del suelo, los resultados son complejos y variados según la intensidad del incendio. En incendios de baja intensidad puede haber incrementos de carbono orgánico procedente de la vegetación parcialmente pirolizada; en cambio, con fuegos de intensidades elevadas la cantidad

de materia orgánica de la superficie del suelo puede disminuir (Mataix-Solera et al., 2002).

Otras propiedades físicas, como la estabilidad de los agregados, también puede cambiar tras el paso del fuego. Generalmente se detecta una reducción de la estabilidad de los agregados relacionado con la pérdida de materia orgánica (DeBano et al., 1998). No obstante, es posible encontrar tendencias contrarias cuando hay incendios de baja intensidad en los que aumenta la materia orgánica (Díaz-Fierros et al., 1987), debido a fusiones de arcillas por calcinación que endurecen los agregados o incluso debido la cementación por las sustancias hidrofóbicas que los hacen más resistentes (Giovannini y Lucchesi, 1983). La porosidad y la capacidad de retención hídrica también pueden verse disminuidas al cambiar la estructura del suelo y desaparecer la materia orgánica si las intensidades son más elevadas (Neary et al., 1999). Estos tres factores, junto con la hidrofobicidad, son aspectos fundamentales en la respuesta hidrológicas de los suelos después de un incendio.

La repelencia al agua es una propiedad de los suelos que reduce su afinidad por el agua. De este modo, la superficie de un suelo repelente al agua puede llegar a ofrecer una resistencia intensa a la humectación, lo que hace disminuir la infiltración del agua acumulada en la superficie, durante períodos de tiempo que pueden oscilar desde unos pocos segundos hasta horas, días o semanas (King, 1981; Dekker y Ritsema, 1994; Doerr y Thomas, 2000). Se ha demostrado la existencia de esta propiedad en diferentes tipos de suelo y bajo diferentes climas y tipos de vegetación de todo el mundo (p.e., Wallis y Horne, 1992; DeBano, 2000a; Doerr et al., 2000). La presencia de la repelencia al agua en el suelo implica una reducción temporal de la capacidad de infiltración, que determina un incremento de la escorrentía superficial y flujos preferenciales subsuperficiales, y en zonas semiáridas es un factor fundamental en el balance hídrico (Doerr et al., 2000). A pesar de esta importancia, su predicción ha sido poco estudiada y los resultados obtenidos no son del todo concluyentes debido a su elevada variabilidad y cantidad de factores de los que depende, que todavía están en proceso de estudio (Scott, 2000; Doerr et al., 2006). La disminución de las tasas de infiltración del agua en el suelo como consecuencia de la repelencia tiene consecuencias hidrológicas y geomorfológicas inmediatas, a las que hay que añadir consecuencias sobre el crecimiento y supervivencia de las plantas. Al disminuir la tasa de infiltración en la superficie del suelo, la repelencia al agua contribuye a reducir el tiempo de generación de escorrentía y a intensificar el flujo superficial, lo que tiene a su vez otras consecuencias importantes como el aumento del riesgo de erosión, el desarrollo de vías de flujo preferencial o el lavado acelerado de agroquímicos en el caso de sistemas agrícolas (Imeson et al., 1992; Ritsema et al., 1993; Doerr y Shakesby, 2006).

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

DeBano et al. (1970) y Savage (1972) observaron que el fuego puede inducir repelencia al agua en suelos que previamente no la mostraban, así como reducirla o incrementarla en suelos que sí la mostraban. La dirección de estos cambios está ligada a la temperatura de la combustión, el tiempo de residencia del calor, la cantidad y el tipo de combustible y la humedad del suelo previa a la acción del fuego, así como el tipo de suelo (Doerr et al., 2000). Por ejemplo, la repelencia al agua varía según la humedad del suelo postincendio, siendo mayor en seco (Berenguer., 2012). En general, la presencia de la repelencia al agua del suelo varía, con algunas muestras manifestando repelencia extrema, pero disminuyendo en profundidad. Asimismo, se encontraron incrementos en la repelencia del suelo a 1 cm de profundidad tras un incendio forestal, aunque la repelencia al agua se reduce con el tiempo tanto en superficie como en profundidad. Este cambio pueden debido al lavado de sustancias hidrofóbicas o a su degradación, al recubrimiento de la superficie del suelo con sedimentos producto de la erosión post-incendio que están compuestos de partículas del suelo y cenizas hidrofílicas y a la falta de deposición de material orgánico hidrofóbico fresco al no haber temporalmente vegetación como consecuencia del incendio. El restablecimiento de la repelencia al agua a niveles de antes del incendio puede llegar a tardar más de 10 años.

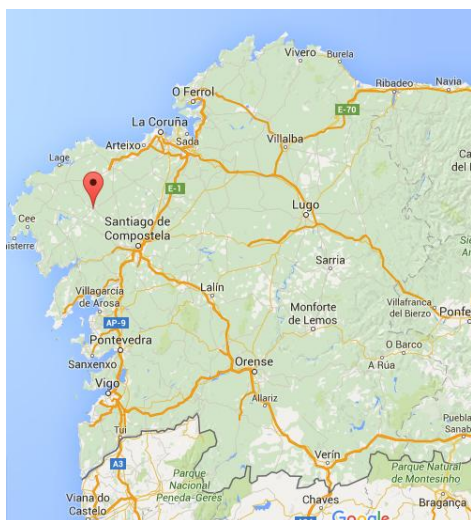
La manera más efectiva de combatir la hidrofobicidad es evitar que se presente. Sabiendo que los compuestos hidrofóbicos que se acumulan en el suelo provienen de la descomposición de la materia orgánica, si se evita la acumulación excesiva se minimiza el riesgo que se desarrolle repelencia. Se ha observado también que el laboreo puede causar abrasión de los agregados, removiendo el suelo y sus recubrimientos orgánicos, y reduciendo su grado de repelencia (King, P.M., 1981). Otra práctica que ayuda a reducir la hidrofobicidad del suelo es la adición de arcilla debido a que una de las causas de la repelencia es una baja superficie específica y, por lo tanto, en suelos de textura gruesa se manifiesta con mayor frecuencia (Wallis et. al., 1992). McGhie y Posner (1980) evaluaron el grado de repelencia al agua en suelos sometidos a diferentes variaciones de pH y concluyeron que bajo condiciones fuertemente alcalinas, es decir, aumentado el pH, se veía reducido el grado de hidrofobicidad. La agregación de agentes humectantes resulta también un método efectivo para combatir la hidrofobicidad (Wallis y Horne, 1992).

En este estudio se analiza la evolución de la repelencia al agua en suelos afectados por un incendio. Además, se ha investigado la utilidad de la aplicación de un polímero hidrofílico (poliacrilamida) para reducir la repelencia al agua en suelos quemados con distintas propiedades.

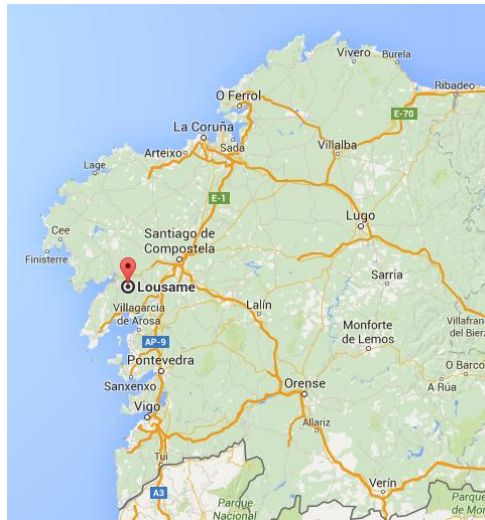
4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Suelos analizados

En este estudio, se han analizado suelos de cuatro zonas diferentes: dos en Galicia, Santa Comba y Lousame (Armada), y dos en Tenerife, Vilaflor y Candelaria. La localización de las zonas de estudio puede verse en la figura 1.



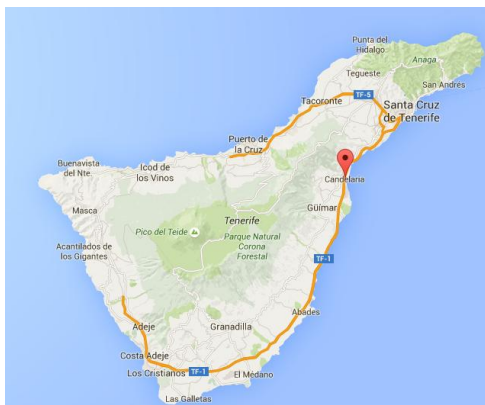
Santa Comba (Galicia)



Armada (Lousame, Galicia)



Vilaflor (Tenerife)



Candelaria (Tenerife)

Figura 1. Localización de las zonas de estudio

Las zonas muestreadas se eligieron con el fin de comparar el comportamiento de la repelencia al agua tras los incendios en diferentes suelos. Los suelos de Vilaflor y Candelaria son suelos con propiedades ándicas formados sobre materiales volcánicos, los cuales presentan fuerte repelencia al agua y muestran un aumento de esta repelencia tras verse afectados por el fuego (Neris et al., 2013). El suelo de Santa

Comba se eligió para comparar los anteriores con suelos con propiedades ándicas formados sobre rocas básicas plutónicas. El suelo de Armada, formado sobre granito, se eligió porque la hidrofobicidad de estos suelos ha sido observada previamente (Varela et al., 2005). En todas las zonas, se tomaron muestras de la superficie (0-2cm de profundidad) de zonas quemadas y zonas adyacentes no quemadas, como control. Las muestras se recogieron a esta profundidad por ser la zona más afectada por el fuego (Cerdá y Jordán, 2010). En los casos de Santa Comba y Lousame se recogió una única muestra compuesta de suelo quemado. En Candelaria y Vilaflor han sido tomadas tres muestras de suelo quemado en tres puntos afectados por distinta intensidad de fuego, ya que proceden de un estudio más amplio en el que se analizará la variabilidad del impacto del fuego en diferentes zonas. En total, se analizaron 12 muestras de suelo diferentes.

Las muestras fueron recogidas utilizando una pala y trasladadas al laboratorio para su posterior procesado. Fueron secadas al aire y tamizadas con un tamiz de 2 mm para separar la fracción tierra fina, que fue empleada para analizar propiedades generales de los suelos y la repelencia al agua.

4.2. Análisis de propiedades generales

Dentro de las propiedades generales de los suelos se ha decidido analizar textura (método de la pipeta), pH (en agua y KCl) y contenido en materia orgánica (método de oxidación en húmedo) por tratarse de propiedades que afectan a la repelencia y se ven afectadas por el fuego.

4.2.1. Textura

Para el análisis de la textura, se pesaron 20 g de suelo seco y tamizado a 2 mm y se añadió H₂O₂ al 6% para eliminar la materia orgánica. Una vez destruida la materia orgánica, se añadieron 50 ml de HCl 1 N para disolver los compuestos de Fe y Al que contribuyen a la agregación. Tras esperar 20 minutos agitando de vez en cuando, se filtraron los sólidos y se lavaron con agua destilada. A continuación se transfirió el contenido de los filtros a botellas de plástico de 1 L, y se añadieron 20 mL del agente dispersante Calgón, agitando la mezcla durante 2 horas. Después de la dispersión, se tamizaron las muestras en húmedo (50 µm) para separar la arena del resto de las fracciones.

El resto del material se transfirió a probetas de plástico de 1 L, se homogeneizó y se tomaron alícuotas de 20 mL con la Pipeta Robison tras distintos tiempos: t=0 (Limo y Arcilla), y t= 8h (Arcilla). Estas alícuotas se recogieron en crisoles y se secaron en estufa a 110°C hasta peso constante.

La suma de todas las fracciones (Arena+Limo+Arcilla) representa el total de las partículas minerales del suelo y debe ser próxima a la cantidad de suelo inicial. Los resultados se expresaron en porcentaje sobre peso seco, y la textura de los suelos fue identificada mediante el triángulo textural.

4.2.2. Determinación de pH

Se midieron dos pH distintos en los suelos:

pH en agua

Permite conocer la acidez activa o actual del suelo, es decir, la concentración de protones existentes en la solución del suelo. Su medida se hizo en una suspensión de suelo y agua. Para ello se pesaron 10 g de suelo seco y tamizado y se colocaron en un vaso de precipitados de 100 mL. A continuación se añadieron 25 mL de agua destilada (relación suelo:solución 1:2,5) y se agitó varias veces con una varilla de vidrio y removiendo el vaso. Al cabo de 10 minutos de preparada la suspensión se efectuó la lectura del pH.

pH en KCl

Esta medida permite conocer la acidez potencial o de cambio del suelo, ya que el K^+ desplaza del complejo de cambio los cationes acidificantes, de ahí que el pH en KCl sea inferior al pH en agua. Para su medida se pesaron 10 g de suelo seco y tamizado y se colocaron en un vaso de 100 mL. Se añadieron 25 mL de una disolución de KCl 0,1 N y se esperó una hora antes de hacer la medida agitando de vez en cuando. Al cabo de este tiempo se efectuó la medida.

4.2.3. Determinación del carbono total y contenido en materia orgánica

Se utilizó el método de la oxidación húmeda. Para ello, se introdujeron 0,5gr de suelo seco, tamizado por 2 mm en un matraz Erlenmeyer de 250 mL. A continuación se añadieron 50 mL de H_2SO_4 concentrado y 25 mL de $K_2Cr_2O_7$ de ataque, agitando y bajo el grifo para evitar un calentamiento excesivo. Luego se introdujo en la estufa a $110^\circ C$ durante aproximadamente hora y media junto a un blanco preparado con iguales cantidades de los reactivos empleados. Finalizado ese tiempo se dejó enfriar y se pasó el contenido de los matraces a otros aforados de 250 mL, enrasando con agua destilada. De esta solución se pasó una alícuota (5 mL) a un vaso de precipitados de 250 mL, se añadió agua destilada (aproximadamente 100 mL), 2 gotas del indicador difenilamina, y 2 gotas de H_3PO_4 concentrado. La mezcla se valoró con Sal de Mohr hasta viraje gris.

4.3 Análisis de la repelencia al agua

La repelencia al agua de los distintos suelos se midió utilizando el método denominado WDPT (del inglés, Water Drop Penetration Time) que consiste en registrar el tiempo que tarda en penetrar una gota de agua en el suelo (Cerdá y Jordán, 2010). Cuanto más tarde, más repelente es el suelo. En este método, se pesaron 10g de suelo seco y tamizado por 2 mm y se colocaron en bandejas circulares de 1,5 cm de radio. A continuación se aplicó una ligera presión sobre la superficie para su homogeneización, y se colocaron 5 gotas de agua destilada sobre la superficie del suelo y se registró el tiempo que tardó en penetrar cada gota de agua en el suelo. Para cada suelo, se

prepararon 3 bandejas, lo que nos da un total de 15 gotas por tipo de suelo (5 gotas X 3 parcelas de cada tipo de suelo).

En primer lugar, se comparó la repelencia al agua de los suelos quemados frente a los suelos de control. Esto se hizo con los suelos secos. A continuación se evaluó la efectividad de PAM para reducir la repelencia al agua solamente en los suelos quemados.

La poliacrilamida usada fue Superfloc A-110 (Kemira Water Solutions BV, Holanda) con peso molecular de 1×10^7 Da y 15% de hidrólisis. La aplicación de PAM se realizó simulando una aplicación en el campo de 1 g/m^2 , para lo que se vaporizó una solución de PAM con una concentración 0.2g/L. A continuación se introdujeron las bandejas en la estufa a 30°C durante 48h para su secado. Una vez secos hasta peso constante, se procedió a la medida del WDPT.

Para comprobar que la modificación de la repelencia al agua se produjo por la aplicación de PAM y no el proceso de humectación, el mismo procedimiento se repitió con otras bandejas sobre las que se vaporizó agua destilada en lugar de la solución de PAM. Estas muestras se secaron también en la estufa a 30°C durante 48h para su secado y se usaron para medir el WDPT.

Tras realizar el WDPT, se tomó como representativo de cada suelo el promedio del tiempo requerido por el número de gotas depositadas. DeBano (1981) sugirió que el suelo podía ser considerado repelente al agua si la gota de agua no se infiltra en los primeros 5 segundos (ver también Roberts y Carbon, 1971). Cuando el tiempo de penetración es largo, las gotas de agua sufren evaporación y pueden empezar a deformarse, lo que ocasiona que sea muy común emplear un sistema de clasificación de la repelencia al agua en lugar del WDPT absoluto. Existen varios sistemas de clasificación de la repelencia desarrollados por diversos autores. En este trabajo se ha optado por emplear el propuesto por Doerr et al. (1998) que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clases de repelencia al agua utilizadas para clasificar la persistencia de la repelencia al agua en los suelos (Doerr et al., 1998).

Clase	WDPT, s
Hidrofílico	<5
Ligeramente repelente	5-10 10-30 30-60
Fuertemente repelente	60-180 180-300 300-600
Severamente repelente	600-900 900-3600
Extremadamente repelente	3600-18000 >18000

4.4. Métodos estadísticos

Las propiedades generales de los suelos, excepto la textura, fueron analizados por triplicado. La repelencia al agua fue ajustada a un modelo lineal con el fuego como efecto principal y las bandejas como efecto anidado dentro del principal.

Las diferencias entre tratamientos fueron analizadas empleando análisis post-hoc. En primer lugar se analizó la homogeneidad de las varianzas mediante el test de Levene. En caso de varianzas iguales, se empleó la prueba de la diferencia honestamente significativa de Tukey. En caso de varianzas desiguales, las diferencias entre medias se analizaron mediante el test T3 de Dunnet.

Todos los análisis se hicieron para un valor de significación $p < 0.05$. El software empleado para el análisis estadístico ha sido el IBM SPSS statistics v. 22.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Textura del suelo

La textura de los suelos analizados se presentan en la tabla 2. Los suelos volcánicos y el suelo de Santa Comba son suelos con texturas bastante equilibradas, entre franco y franco limosos, mientras que el suelo granítico tiene un mayor contenido en arena, lo cual puede asociarse con la presencia de repelencia al agua.

Tabla 2. Fracciones texturales (%) y textura de los diferentes suelos.

		Fracciones texturales (%)			Textura
		Arena	Limo	Arcilla	
Armada	Quemado	80.54	8.34	11.12	Arenoso franco
	No Quemado	72.51	13.75	13.74	Arenoso franco
St.Comba	Quemado	48.48	37.96	13.56	Franco limoso
	No Quemado	60.29	31.20	8.51	Franco arenoso
Candelaria	Quemado 1	57.51	31.16	11.33	Franco
	Quemado 2	57.13	37.51	5.36	Franco
	Quemado 3	54.88	39.81	5.31	Franco
	No Quemado	45.51	41.52	12.97	Franco limoso
Vilaflor	Quemado 1	52.62	39.90	7.48	Franco
	Quemado 2	60.32	32.24	7.44	Franco
	Quemado 3	49.61	38.94	11.45	Franco
	No Quemado	68.09	29.25	2.66	Franco arenoso

La repelencia al agua del suelo está asociada a las fracciones texturales gruesas del suelo, tal como se demostró en el caso de suelos arenosos (Roberts y Carbon, 1971; McGuie y Posner, 1980. DeBano, 1991). Dada una determinada cantidad de sustancias hidrofóbicas capaces de recubrir las partículas del suelo, las partículas más gruesas serían más susceptibles de desarrollar repelencia al agua dada su menor superficie específica (Giovannini y Luchesi, 1983; Blackwell, 1993). Crockford et al., (1991) encontraron que la repelencia al agua se veía incrementada con el tamaño de partícula en suelos. Por otro lado DeBano (1991) concluyó que la repelencia al agua

es más proclive a darse en suelos con menos de un 10% de contenido en arcillas. A pesar de esto, existen otras propiedades del suelo que influyen en la repelencia al agua, ya que un suelo de textura fina podría también mostrar un grado elevado de repelencia al agua. Trabajos realizados por diversos autores (Crockford et al., 1991; Doerr et al., 1996) confirman este hecho, ya que han observado niveles de repelencia al agua en suelos de textura fina tan elevados como en otros tipos de suelo.

5.2. Niveles de pH

La tabla 3 presenta los valores medios de pH en agua y KCl de todas las muestras de suelo.

Tabla 3. Valores de pH en los diferentes suelos.

		Evaluación Porta et al., (2003)	pH	
			H ₂ O	KCl
Armada	Quemado	Neutro	6.86 a*	6.46a
	No Quemado	Muy fuertemente ácido	4.48b	3.80b
St.Comba	Quemado	Fuertemente ácido	5.41a	4.70a
	No Quemado	Muy fuertemente ácido	4.71b	4.14b
Candelaria	Quemado 1	Ligeramente ácido	6.39c	5.80b
	Quemado 2	Neutro	7.22b	6.97a
	Quemado 3	Moderadamente básico	7.58a	7.24a
	No Quemado	Moderadamente ácido	5.81d	5.31c
Vilaflor	Quemado 1	Neutro	6.56b	6.27b
	Quemado 2	Neutro	6.71b	6.18b
	Quemado 3	Neutro	7.18a	6.84a
	No Quemado	Moderadamente ácido	5.71c	4.58c

* Letras diferentes indican valores de pH significativamente diferentes para una solución de medida y tipo de suelo.

Los suelos más ácidos son los gallegos, que en el caso de ser no quemados tienen valores de pH muy fuertemente ácidos, mientras que los de Candelaria y Vilaflor son moderadamente ácidos. El fuego produce un aumento significativo del pH en agua y en KCl en todos los suelos. En Armada, el suelo pasa de ser muy fuertemente ácido a neutro tras la acción del fuego. En Santa Comba cambia de muy fuertemente ácido a fuertemente ácido. En Vilaflor el suelo era moderadamente ácido y pasa a ser neutro tras el incendio. En el caso de Candelaria, además de que los suelos quemados superan en pH a los no quemados, las diferencias de pH entre suelos quemados demuestran que han experimentado diferentes intensidades de fuego.

En el caso del pH en KCl, que indica la acidez potencial del suelo, aumenta también después del fuego. Hay que destacar que la diferencia entre los pH en agua y KCl es menor en suelos quemados que en suelos sin quemar, lo que indica que el fuego es eficaz reduciendo la acidez del complejo de cambio.

Los cambios en el pH del suelo en las parcelas quemadas parecen estar causados principalmente por la oxidación de la materia orgánica del suelo, la formación de ión carbonato en las cenizas y la liberación de grandes cantidades de cationes después de la acción del fuego, que substituyen a los cationes ácidos del complejo de cambio y contribuyen al aumento del pH (Jordán et al., 2009).

5.3. Carbono Total y Contenido en Materia Orgánica

La tabla 4 muestra los valores de C y materia orgánica (MO) medidas en los suelos. En las muestras de incendios forestales, el carbono orgánico total (TOC) osciló entre 1.22 % y 11.08%.

Tabla 4. Porcentajes de carbono (C) y materia orgánica (MO) en los diferentes suelos.

		%C	%MO.
Armada	Quemado	11.08a*	19.05a
	No Quemado	3.84b	6.61b
St.Comba	Quemado	8.05a	13.85a
	No Quemado	7.08b	12.18b
Candelaria	Quemado 1	8.99a	15.46a
	Quemado 2	5.93b	10.20b
	Quemado 3	4.84c	8.33c
	No Quemado	5.81cb	10.00b
Vilaflo	Quemado 1	5.29a	9.10a
	Quemado 2	2.24b	3.86b
	Quemado 3	1.22c	2.09c
	No Quemado	5.41a	9.31a

* Letras diferentes indican valores de contenido de carbono y materia orgánica significativamente diferentes para cada tipo de suelo.

En general, el fuego provocó un aumento del carbono del suelo, lo que indica que los fuegos sufridos por los suelos fueron de baja severidad, ya que conforme aumenta la temperatura de combustión los compuestos orgánicos desaparecen. Los residuos de la combustión de compuestos orgánicos procedentes de materiales como la madera, la hojarasca o la materia orgánica del suelo, asociados con combustiones de baja intensidad, entre 250-500 °C, pueden resultar en acumulaciones de carbono en el suelo. Además, pueden producir sustancias hidrofóbicas al eliminar los grupos funcionales oxigenados e incrementar los aromáticos (González-Vila et al., 2009). La excepción son los suelos Quemado 3 de Candelaria y los suelos de Vilaflor. Es posible que en estos puntos se hayan producido fuegos de mayor intensidad que han disminuido la cantidad de carbono del suelo.

Aparte de las investigaciones de la influencia directa de la vegetación y microorganismos en la repelencia al agua, los investigadores también han procurado establecer relaciones generales entre la materia orgánica en los suelos y/o contenido de carbono orgánico y el grado de repelencia (Doerr et al., 2000). Los resultados, sin embargo, no han sido concluyentes. Se han encontrado correlaciones positivas entre el contenido en materia orgánica del suelo y la persistencia de la repelencia al agua por diferentes autores, pero también se han observado correlaciones pobres, negativas o no significativas, e incluso resultados contradictorios en función del tipo de vegetación o el uso. Como una posible explicación, muchos autores han concluido que la repelencia al suelo puede estar controlada por el tipo y calidad de la materia orgánica más que por su cantidad (DeBano et al., 1970; Wallis y Horne, 1992).

5.4. Efectos del fuego sobre la repelencia al agua del suelo

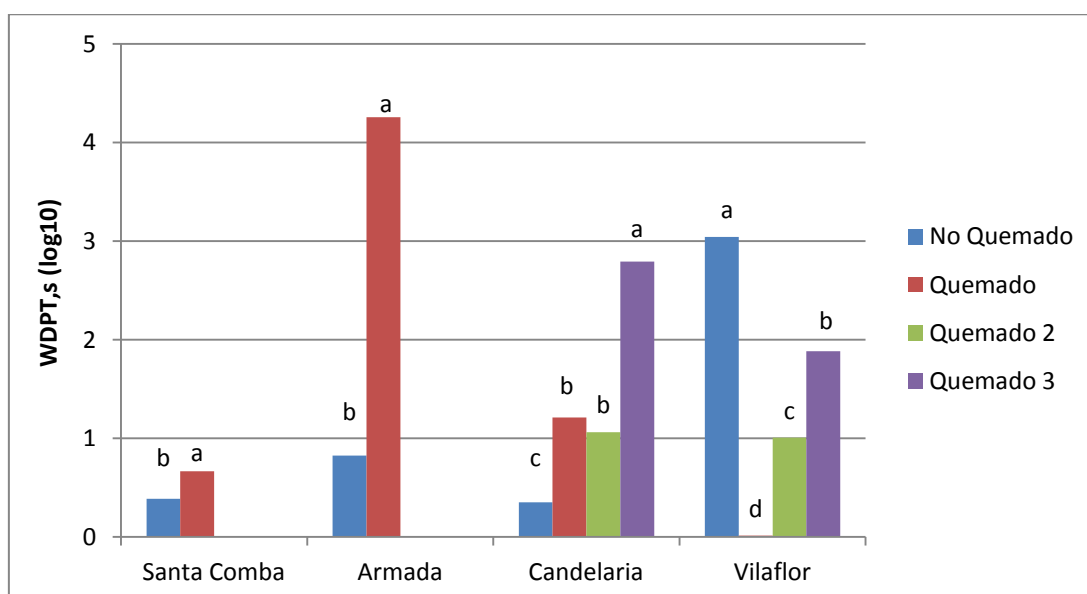


Figura 2. Resultados del test de penetración de la gota de agua representados mediante gráfico de barras. Comparación del Water Drop Penetration Time (WDPT) medido en segundos para cada tipo de suelo. La escala del eje Y está expresada en logaritmo. Letras diferentes dentro de un mismo suelo indican diferencias significativas entre tratamientos.

Los suelos de Santa Comba, Armada y Candelaria muestran un aumento del tiempo de penetración de la gota de agua en zonas quemadas en comparación con las muestras de suelo no quemado. Se trata de suelos que han visto aumentada su repelencia al agua tras verse afectados por el fuego. En el caso de Vilaflor, la repelencia al agua se ha visto reducida tras el incendio. Por tanto, se han observado dos situaciones diferentes: o bien la repelencia al agua es mayor en zonas quemadas (Santa Comba, Armada, Candelaria), o bien ha sido destruida (Vilaflor).

Tabla 5. Clasificación (Doerr et al., 1998) de los suelos en seco, según su WDPT.

Suelo	Tratamiento			
	No quemado	Quemado		
		<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>
Santa Comba	Hidrofílico	Hidrofílico	-	-
Armada	Ligeramente repelente al agua	Extremadamente repelente al agua	-	-
Candelaria	Hidrofílico	Severamente repelente al agua	Ligeramente repelente al agua	Ligeramente repelente al agua
Vilaflor	Severamente repelente al agua	Fuertemente repelente al agua	Ligeramente repelente al agua	Hidrofílico

La clasificación de la repelencia al agua se muestra en la tabla 5. Los resultados indicaron que en total, menos del 35% de las muestras de suelo eran hidrofílicas, encontrando repelencia al agua en tres de las zonas de estudio, incluso con valores de persistencia extrema (Tabla 5). Hay que señalar que en Santa Comba el suelo es hidrofílico y continúa siendo hidrofílico tras la acción del fuego, ya que su WDPT se ve un poco aumentado (figura 2) pero no lo suficiente como para ser considerado repelente. El suelo que sufre un mayor cambio es el de Armada, que era ligeramente repelente al agua y tras el incendio ha visto incrementada su repelencia, convirtiéndose en un suelo extremadamente repelente al agua. En Candelaria, el suelo era hidrofílico antes del incendio y ha pasado a ser ligera y severamente repelente al agua, posiblemente porque fueron afectados por distinta intensidad del fuego. El suelo de Vilaflor era un suelo severamente repelente al agua y esta repelencia se ha visto prácticamente destruida tras la acción del fuego. Este suelo ha pasado de ser severamente repelente a ser hidrofílico, fuerte o ligeramente repelente al agua según la diferente intensidad del fuego.

Varios autores (DeBano, 1966; DeBano y Krammes, 1966; DeBano et al., 1970; Savage, 1972) han observado que el fuego puede inducir repelencia al agua sobre suelos que previamente no la presentaban (como los de Armada y Candelaria). Robichaud y Hungerford (2000) observaron que al someter a diferentes tipos de suelo a calentamiento en laboratorio se generan gradientes de temperatura que provocan la redistribución de las sustancias hidrofóbicas en el suelo. Además, observaron interacciones entre la temperatura, el contenido de agua y otras propiedades del suelo.

Factores como la temperatura alcanzada, la cantidad y tipo de hojarasca consumida y la humedad del suelo antes de producirse el incendio, pueden intensificar o reducir la repelencia al agua en los suelos.

Comparando los valores de repelencia al agua con los contenidos en materia orgánica de los suelos (tabla 4), se puede observar que no hay una relación clara entre los dos. En algunos casos, como en Armada, la repelencia al agua y el contenido en materia orgánica aumentan por el fuego. Sin embargo, en Candelaria o Vilaflor esto no es así. Se deduce, por tanto, que la repelencia no está condicionada solamente por el contenido en materia orgánica, sino que, seguramente, también influye su composición. La repelencia al agua inducida por el fuego es el resultado de reacciones químicas que tienen lugar durante el proceso, que intensifica las uniones entre estas sustancias y las partículas del suelo (Savage, et al., 1972) y las hace aún más hidrofóbicas a causa de la pirolisis (Giovannini, 1994), más que los mecanismos de volatilización-condensación. Además, factores como la acumulación de cenizas, la volatilización de los compuestos orgánicos durante la combustión y su posterior condensación alrededor de los agregados del suelo, pueden inducir o incrementar la hidrofobicidad.

5.5. Efecto del PAM sobre la repelencia al agua

Los resultados de WDPT obtenidos en los suelos quemados tras mojar el suelo y tras el tratamiento con PAM pueden observarse para los distintos suelos en las figuras 5 (Santa Comba), 6 (Armada), 7 (Candelaria) y 8 (Vilaflor). Además, se acompaña de la correspondiente clasificación en clases de repelencia para cada uno de los suelos en la tabla 6.

La humectación de los suelos produjo un descenso de la repelencia al agua en todas las muestras menos en el suelo de Santa Comba y en la muestra Quemado 3 de Vilaflor. Es decir, la humectación reduce la repelencia al agua en aquellos suelos que no son hidrofílicos. Este descenso es más acusado en el suelo de Armada, donde el suelo pasa de extremadamente repelente al agua (WDPT de más de 5 h) a ligeramente repelente al agua (14.4 s).

La aplicación de PAM reduce todavía más la repelencia al agua excepto en el suelo de Armada y en la muestra Quemado 3 de Vilaflor. En total, cerca del 90% de las muestras de suelo se volvieron hidrofílicas tras la aplicación del tratamiento con PAM, es decir, vieron eliminada con gran efectividad su resistencia a la penetración del agua. En Santa Comba el suelo ya era hidrofílico en seco, aun así, su WDPT se vio reducido tras la humectación y más aún tras el tratamiento con PAM. El suelo de Armada, que era extremadamente repelente inicialmente, pasó a ser prácticamente hidrofílico tras la aplicación del PAM. En el caso de Candelaria, el suelo era severa y ligeramente repelente al agua según la intensidad del fuego. Su repelencia se vio reducida tras la humectación convirtiéndose en hidrofílico, como hemos dicho antes, y esta reducción fue mayor tras la aplicación del PAM.

En Vilaflor el suelo en seco se mostraba entre fuerte y ligeramente repelente al agua según la intensidad del fuego. Tras la humectación esta repelencia se vio reducida, y al aplicar el tratamiento con PAM pasó a tratarse de un suelo hidrofílico.

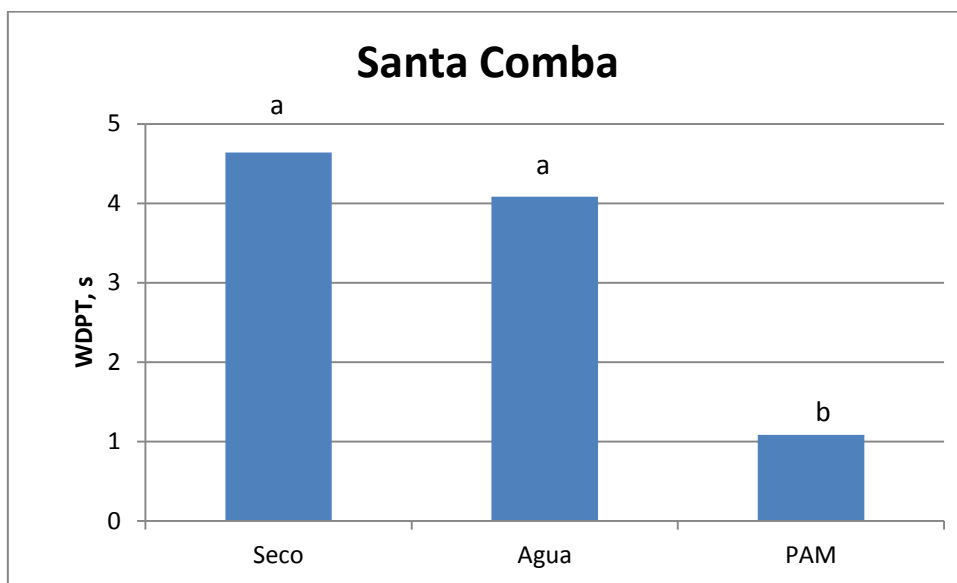


Figura 2. Tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT) expresado en segundos en el suelo de Santa Comba afectado por el fuego. Letras diferentes indican diferencias significativas.

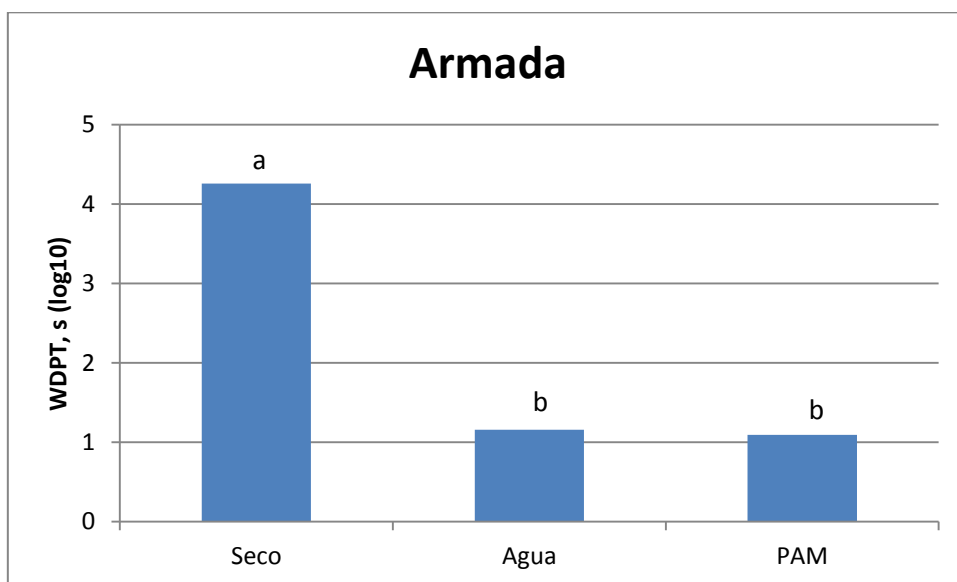


Figura 3. Tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT) expresado en segundos (a escala logarítmica para su mejor visualización) en el suelo de Armada afectado por el fuego. Letras diferentes indican diferencias significativas.

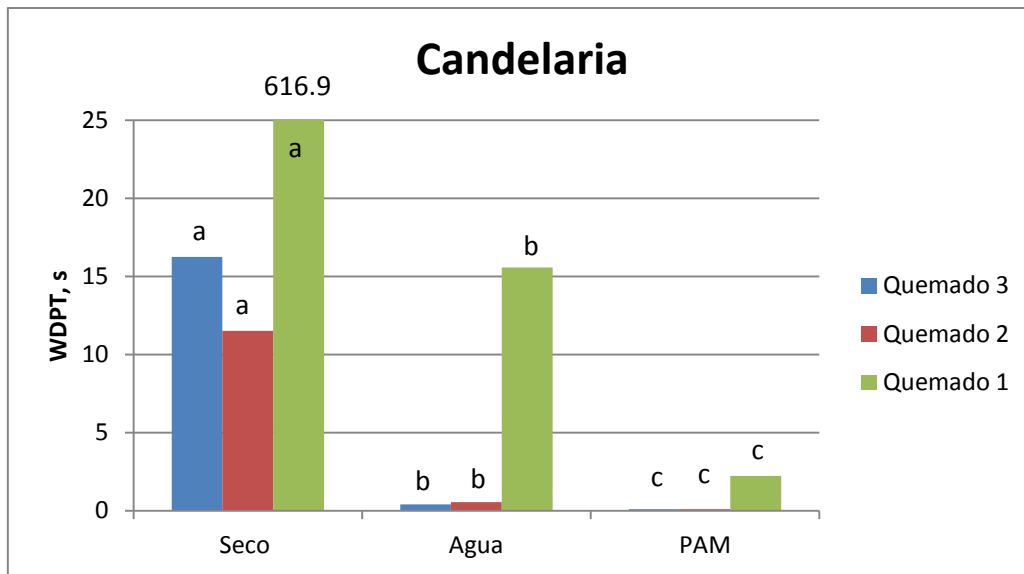


Figura 4. Tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT) expresado en segundos en los suelos de Candelaria afectados por el fuego. NOTA: El valor de la variable en el suelo Q3 en seco supera el valor máximo del eje Y. Letras diferentes indican diferencias significativas dentro de un mismo suelo.

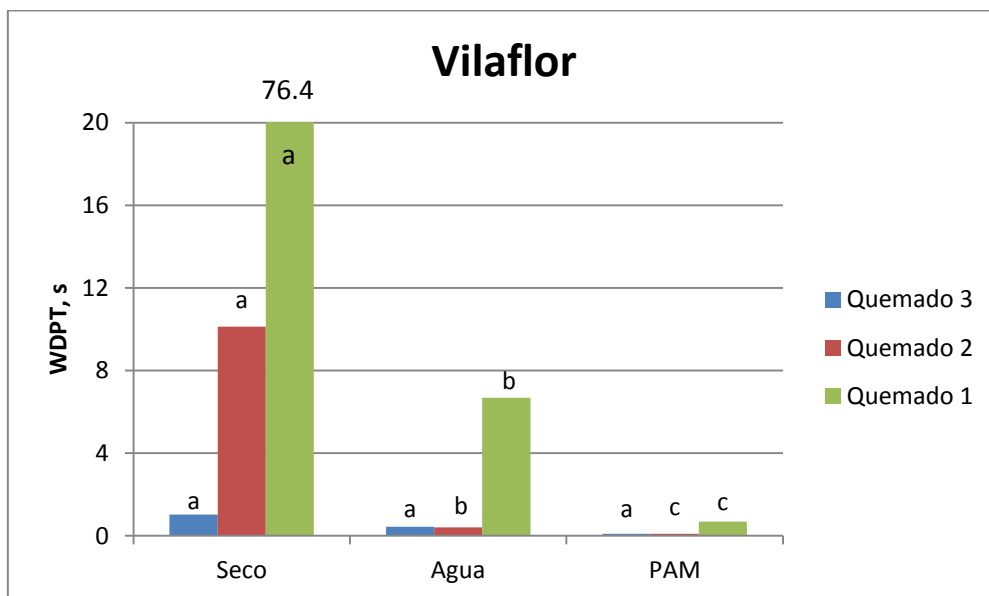


Figura 5. Tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT) en los suelos de Vilaflor afectados por el fuego tras los distintos tratamientos. NOTA: El valor de la variable en el suelo Q3 en seco supera el valor máximo del eje Y. Letras diferentes dentro de un mismo suelo indican diferencias significativas.

Tabla 6. Clasificación (Doerr et al., 1998) de los suelos quemados en seco, humectados y tras el tratamiento con PAM, según su WDPT.

		Seco	Agua	PAM
St.Comba	Quemado	Hidrofílico	Hidrofílico	Hidrofílico
Armada	Quemado	Extremadamente repelente al agua	Ligeramente repelente al agua	Ligeramente repelente al agua
Candelaria	Quemado 1	Severamente repelente al agua	Ligeramente repelente al agua	Hidrofílico
	Quemado 2	Ligeramente repelente al agua	Hidrofílico	Hidrofílico
	Quemado 3	Ligeramente repelente al agua	Hidrofílico	Hidrofílico
Vilaflor	Quemado 1	Fuertemente repelente al agua	Ligeramente repelente al agua	Hidrofílico
	Quemado 2	Ligeramente repelente al agua	Hidrofílico	Hidrofílico
	Quemado 3	Hidrofílico	Hidrofílico	Hidrofílico

En resumen, en los suelos sobre los que ha sido aplicado el polímero orgánico PAM se ha visto reducido el tiempo de penetración de la gota de agua en el 100% de los casos. De hecho, si inicialmente la repelencia al agua de los suelos fue variable, ya que había casos de suelos hidrofílicos, y otros severamente o extremadamente repelentes, tras la adición del PAM todos los suelos excepto el de Armada se volvieron hidrofílicos. Este último no alcanzó esta categoría por una diferencia de tan solo 7.4 segundos. Esto lleva a la conclusión de que la aplicación de PAM resulta efectiva para la mitigación de la repelencia al agua en suelos quemados.

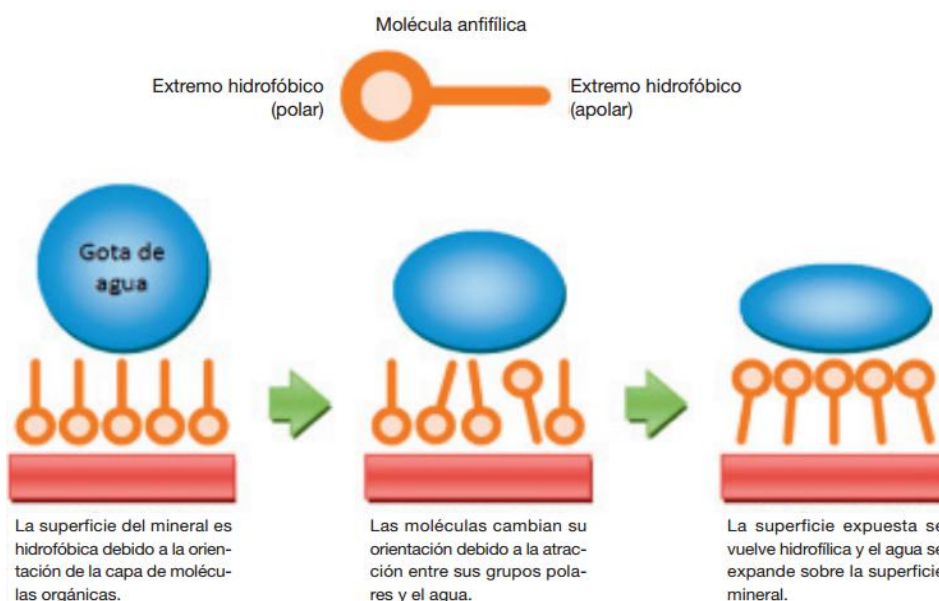


Figura 6. Representación esquemática de una molécula de carácter anfipático (parte superior) y secuencia de cambios en la orientación de moléculas anfipáticas sobre una superficie mineral en contacto con el agua (Cerdá et al.; 2010).

Por otro lado en suelos humectados también se ha visto reducido, aunque en menor grado, el tiempo de penetración de la gota de agua. Posiblemente, este fenómeno se deba al efecto de la humectación en la reorganización de las partículas del suelo. El cambio de orientación de las moléculas de la superficie del suelo puede provocar que una superficie hidrofóbica se vuelva hidrofílica tras la humectación, como se puede observar en la Figura 6.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo hemos analizado el efecto del fuego sobre suelos con diferentes propiedades, tratando con especial atención el efecto sobre la repelencia al agua.

Además hemos analizado la idoneidad de la aplicación de PAM para reducir la repelencia al agua en estos suelos.

De este estudio se ha podido concluir que:

- Las propiedades generales del suelo, como son la textura, el pH y el contenido de carbono, se ven modificadas por la acción del fuego, llevando a un aumento de pH por la liberación de cationes en la combustión de la materia orgánica del suelo.
- En suelos hidrofílicos se ve aumentada la repelencia al agua tras la acción del fuego. En suelos que ya presentaban repelencia al agua, ésta se ve eliminada o reducida tras el incendio.
- La humectación en suelos repelentes produce una disminución de la repelencia al agua debido a la redistribución de los compuestos orgánicos que producen la repelencia al agua.
- La adición de un polímero hidrofílico como el PAM reduce todavía más la repelencia al agua.

En los suelos sobre los que ha sido aplicado el polímero orgánico PAM se ha visto reducido el tiempo de penetración de la gota de agua en el 100% de los casos. Esto lleva a la conclusión de que la aplicación de PAM resulta efectiva para la mitigación de la repelencia al agua en suelos quemados.

7. CONCLUSIONS

In this study, we have analyzed the effect of fire on soils with different properties, paying special attention to the effect on post-fire water repellency. In addition, we have analyzed the suitability of the application of PAM to reduce water repellency in these soils.

It has been concluded that:

- General soil properties such as texture, pH, and carbon content, are modified by the action of fire, leading to an increase in pH by the release of cations in the combustion of organic matter in the soil. These modifications are not homogeneous and vary from soil to soil.
- In hydrophilic soils and soils with low water repellency, water repellency is increased after the action of fire. In soils with some initial water repellency, it is reduced or eliminated after the fire.
- Wetting repellent soils causes a decrease in water repellency most probably because the redistribution of organic compounds that produce water repellency.
- The addition of a hydrophilic polymer as the PAM further reduces water repellency.

In soils treated with the organic polymer PAM, Water Drop Penetration Time (WDPT) was reduced in all of the cases. This fact leads to the conclusion that the application of PAM is effective for mitigation of water repellency in burned soils.

8. BIBLIOGRAFÍA

Berenguer Bodí, M. (2012). *Efectos de las cenizas y la repelencia al agua en suelos afectados por incendios forestales en ecosistemas mediterráneos* (Tesis Doctoral). Universitat de València.

Blackwell, P.S. (1993). Improving sustainable production from water repellent sands. *Western Australia Journal of Agriculture* 34: 160-167.

Cerdá, A.; Jordán, A. 2010. Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales. FUEGORED, Cátedra de Divulgació de la Ciència, Universitat de València. 521 pp.

Crockford, H.; Topalidis, S., Richardson, D.P. (1991). Water repellency in a dry sclerophyll eucalypt forest-measurements and processes: *Hydrological Processes* 5: 405-420.

DeBano, L.F. (1981). *Water-repellent soils: a state of the art*. General Technical Report, PSW-46. United States Department of Agriculture, Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, CA.

DeBano, L.F. (1991). *The effects of fire on soil properties*. General Technical Report, INT-280. United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Experiment Station, Berkeley, CA.

DeBano, L.F. (2000). Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology* 231/232, 4-32.

DeBano, L.F.; Krammes, J.S. (1966). Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *International Association of Hydrologic Science* 2, 14-19.

DeBano, L.F.; Mann, L.D.; Hamilton, D.A. (1970). Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. *Soil Science Society of America Proceedings* 34: 130-133.

DeBano, L. F. (1991). The effect of fire on soil properties. Harvey, A. C., and L. F. Neuenschwander, compilers, Proceedings - Management and Productivity of Western-Montane Forest Soils. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-280: 151-156.

DeBano, L.F.; Neary, D.G.; Ffolliott, P.F. (1998). *Fire's Effects on Ecosystems*. John Wiley and Sons, New York.

Dekker, L.W.; Ritsema, C.J. (1994). How water moves in a water-repellent sandy soil. 1. Potential and actual water-repellency. *Water Resources Research* 30: 2507-2517.

Díaz-Fierros, F.; Benito, E.; Pérez, R. (1987). Evaluation of the U.S.L.E. for prediction of erosion in burnt forest areas in Galicia (NW Spain). *Catena*, 14: 189-199

Doerr S.H., Shakesby R., Walsh R. (1996). Soil hydrophobicity variations with depth and particle size fraction in burned and unburned *Eucalyptus globulus* and *Pinus piaster* forest terrain in the Agueda basin, Portugal. *Catena*, 27: 25–47

Doerr S.H. (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 Surf. Process. Landforms*, 23: 663–668.

Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D. (1998). Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests. *Soil Science*, 163: 313–324

Doerr, S.H.; Shakesby, R.A.; Walsh, R.P.D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics, and hydro-geomorphological significance. *Earth Science Reviews* 51: 33-65.

Doerr, S.H.; Thomas, A.D. (2000). The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology* 231/232: 134-147.

Doerr, S.H.; Shakesby, R.A.; Blake, W.H.; Chafer, C.J.; Humphreys, G.S.; Wallbrink, P.J. (2006). Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrologic response. *Journal of Hydrology* 319: 295-311.

Giovannini, G.; Lucchesi, S. (1983). Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates. *Soil Science* 136: 231-236.

Giovannini, G.; Lucchesi, S.; Cervelli, S. (1983). Water repellent substances and aggregate stability in hydrophobic soil. *Soil Science* 135: 110-113.

Giovannini, G. (1994). The effect of fire on soil quality. Soil degradation and desertification in Mediterranean environments. J.L. Rubio, A. Calvo (eds.), Geofoma ediciones, Logroño 9-12.

González-Vila FJ, Almendros G, González Pérez JA, Knicker H, González Vázquez R, Hernández Z, PiedraBuena A, De la Rosa JM. 2009. Transformaciones de la materia orgánica del suelo por incendios naturales y calentamientos controlados en condiciones de laboratorio. En: Cerdà A, Mataix-Solera J, editors. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Cátedra de Divulgación de la Ciencia. Universitat de València. p. 219-267.

Imeson, A.C.; Verstraten, J.M.; van Mulligan, E.J.; Sevink, J. (1992). The effects of fires and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena* 19: 345-361.

Jordán, A.; Zavala, L.M.; Nava, A.L.; Alanis, N. (2009). Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena* 79: 60-71.

Jungerius, P.D.; van der Meulen, F. (1988). Erosion processes in a dune landscape along the dutch coast. *Catena* 15: 217-28.

Jungerius, P.D.; de Jong, J.H. (1989). Variability of water repellence in the dunes along the Dutch coast. *Catena* 16: 491-497.

King, P.M. (1981). Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement: *Australian Journal of Soil Research* 19: 275-285.

MAPA-Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1995). *Métodos oficiales de análisis. Tomo III: Métodos oficiales de análisis de suelos y aguas para el riego*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Servicio de Publicaciones. Madrid pp. 205-285.

Mataix-Solera J., Gómez, I.; Navarro-Pedreño, J.; Guerrero, C.; Moral, R. (2002). Soil organic matter and aggregates affected by wildfire in a *Pinus halepensis* forest in Mediterranean environment. *International Journal of Wildland Fire* 11: 107-114.

Mataix-Solera J.; Arcenegui V.; Guerrero C.; Mayoral A.M.; González J.; García-Orenes F.; Gómez I. (2007). Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid Mediterranean environment. *Hydrological Processes* 21: 2300-2309.

McGhie, D.A.; Posner, A.M. (1980). Water repellence of a heavy-textured Western Australian surface soil. *Australian Journal of Soil Research* 18: 309-323.

Moral, F.J.; Giráldez, J.V.; Laguna, A.M. (2002). La hidrofobia en los suelos arenosos del parque natural de Doñana: caracterización y distribución. *Ingeniería del Agua* 9: 37-50.

Moral García, F.J.; Dekker, L.W.; Oostindie, K.; Ritsema, C.J. (2005). Water repellency under natural conditions in sandy soils of southern Spain. *Australian Journal of Soil Research* 43: 291-296.

Neary, D.G., C.C. Klopatek, L.F. DeBano, and P.F. Ffolliott. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management* 122:51-71.

Neris, J.; Tejedor, M.; Fuentes, J.; Jiménez, C. (2013). Infiltration, runoff and soil loss in Andisols affected by forest fire (Canary Islands, Spain). *Hydrological Processes* 27: 2814-2824.

Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ªEdición. Ediciones Mundi-Prensa, 960pp. Madrid.

Raison, R. J., P. K. Khanna, and P. V. Woods. (1985). Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Canadian Journal of Forest Research* 15:132-140.

Ritsema, C.J.; Dekker, L.W.; Hendrickz, J.M.H.; Hamminga, W. (1993). Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research* 28: 2183-2193.

Ritsema, C.J.; Dekker, L.W. (1994). How water moves in a water-repellent soil: 2. Dynamics of fingered flow. *Water Resources Research* 30: 2519-2531.

Roberts, F.J.; Carbon, B.A. (1971). Water repellence in sandy soils of southwestern Australia. I. Some studies related to field occurrence: Field Station Record, CSIRO Division of Plant Industry 10: 13-20. Australia.

Robichaud, P. R.; Hungerford, R. D. (2000). Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology*. 231-232(2000): 207-219.

Savage, S.M.; Osborn, J.; Letey, J.; Heton, C. (1972). Substances contributing to fire induced water repellency in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 36: 674-678.

Scott, D.F. (2000). Soil wettability in forested catchments in South Africa; as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. *Journal of Hydrology* 231: 87-104.

Varela, M.E.; Benito, E.; de Blas, E. (2005). *Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain*. Wiley InterScience 19: 3649-3657.

Wallis, M.G.; Horne, D.J. (1992). Soil water repellency. *Advances in Soil Science* 20: 91-146.