



# Influencia de la litología en el comportamiento hidrofóbico en suelos de baja pendiente con cultivo de *Eucalyptus globulus*. Costa Asturiana

---

Trabajo Fin de Máster

**Nagore Pastor Berasategui**

**Julio 2016**



El presente trabajo ha sido realizado como Trabajo de Fin de Máster para el título de postgrado “Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica” que se imparte en la Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo.

La Dra. Susana del Carmen Fernández Menéndez, profesora titular del área de Geodinámica Externa de la Universidad de Oviedo, certifica que ha dirigido y revisado la tesis de Máster que tiene por título: “Influencia de la litología en el comportamiento hidrofóbico en suelos de baja pendiente con cultivo de *Eucalyptus globulus*. NW de la costa Asturiana” realizada por Nagore Pastor Berasategui, y autoriza la presentación y defensa del trabajo.

En Oviedo, el 11 de Julio de 2016

Fdo. Susana del Carmen Fernández Menéndez

Fdo. Nagore Pastor Berasategui

## Agradecimientos

Durante el tiempo de realización de este trabajo, han sido varias las personas, que de una u otra manera, han colaborado en su realización. En este apartado me gustaría mostrarles mi agradecimiento.

En primer lugar, quiero dar las gracias, a mi directora de tesis, Dra. Susana del Carmen Fernández Menéndez por sus consejos y colaboración durante la realización de este trabajo.

A la Dra. Cristina Santín Nuño por su colaboración en este trabajo.

A mis padres y hermano por su apoyo incondicional.

A Iker Arrieta, por acompañarme incansable durante la recogida de muestras.

## Índice:

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción y objetivos	3
1.1. Situación geográfica	3
1.2. Contexto geológico	4
1.2.1. Geología de la zona A	4
1.2.2. Geología de la zona B	5
1.3. Antecedentes	6
2. Hidrofobicidad: Causas y factores	8
2.1. La hidrofobicidad	8
2.2. Causas físico-químicas de la hidrofobicidad	8
2.3. Factores que influyen en la hidrofobicidad de los suelos	9
2.3.1. Materia orgánica y humus del suelo	9
2.3.2. Vegetación	10
2.3.3. Hongos y microorganismos del suelo	10
2.3.4. Textura del suelo y contenido en arcillas	10
2.3.5. Contenido en humedad	11
2.3.6. Incendios	11
2.4. Erosión de suelos causados por la hidrofobicidad	12
2.5. Posibles soluciones contra la hidrofobicidad	13
3. Materiales y métodos	15
3.1. Descripción de las parcelas	15
3.1.1. Descripción de la vegetación que forma el sotobosque	15
3.2. Toma de muestras	16
3.3. Tratamiento en el laboratorio	17
3.3.1. Secado	17
3.3.2. Determinación del grado de hidrofobicidad	18
3.3.3. Tamizado	20
3.3.4. <i>Total Organic Carbon (TOC)</i>	20
3.3.5. pH	21
3.3.6. Conductividad eléctrica (CE)	22
3.3.7. Análisis estadístico	22
4. Resultados y discusión	24
4.1. Relaciones entre parámetros medidos “in situ” en cada parcela	25
4.2. Parámetros analizados en laboratorio	26
4.2.1. Contenido en humedad	26
4.2.2. Análisis <i>Water Drop Penetration Time test</i>	26
4.2.3. Análisis granulométrico	28
4.2.4. Carbono Orgánico Total (TOC)	29
4.2.5. pH y CE	29

4.2.6. Correlaciones	32
5. Conclusiones	34
6. Bibliografía	36

# RESUMEN

---

La hidrofobicidad de los suelos es un factor con creciente interés científico desde los años 80 hasta la actualidad. Las consecuencias de la hidrofobicidad o repelencia al agua en los suelos son múltiples ya que deriva en una mayor escorrentía superficial y en la creación de zonas de flujo preferente. Esto hace que la erosión de los suelos aumente pudiendo llegar a una pérdida de volumen de suelo crítica. Por supuesto las plantas se ven afectadas ya que el agua disponible para crecer adecuadamente disminuye.

Son muchos los factores que influyen en el incremento de la hidrofobicidad de los suelos pero no está claro el grado de influencia que conlleva cada uno de ellos. Los factores principales analizados por diversos autores son el tipo de vegetación, el tipo de materia orgánica, los incendios, la textura del suelo, el contenido en arcillas, la humedad del suelo,...

El objetivo de este trabajo ha sido determinar el grado de hidrofobicidad en suelos tomados bajo plantaciones de *Eucalyptus globulus* y ver si guarda alguna relación con la litología del sustrato en el litoral del Principado de Asturias. Para ello se tomaron sobre dos sustratos litológicos diferenciados: A) Arenisca y B) Caliza.

La hidrofobicidad se midió mediante el *Water Drop Penetration Time* test (WDPT) tanto en el horizonte mineral como en el horizonte orgánico. El horizonte mineral además se tamizó para posteriormente analizar la relación entre cada fracción (>2mm, 2 mm-400  $\mu$ , 400  $\mu$ -63  $\mu$ m y <63  $\mu$ m) y la hidrofobicidad del suelo.

Los resultados indican que el factor más determinante en el grado de hidrofobicidad de los suelos es la edad de la plantación y no la litología subyacente. En el transecto de muestras nombrada como A2, que corresponde con la plantación más joven de todas las analizadas se observan suelos hidrofílicos. El resto de plantaciones de más edad y con árboles (*E. globulus*) de mayor tamaño (y en consecuencia un horizonte orgánico de mayor espesor y evolución, como es lógico en una plantación más madura) muestran suelos fuerte o muy fuertemente hidrofóbicos. Por otro lado los resultados de pH obtenidos muestran sus valores más altos en la plantación más joven, A2, coincidiendo con los suelos con los valores más hidrofílicos.

Estos datos hacen pensar que la prolongación en el tiempo de la propia actividad de la plantación forestal de *Eucalyptus globulus* es la causante directa tanto de la bajada de valores de pH como del aumento de la hidrofobicidad de los suelos.

# Abstract

---

The hydrophobicity of soils is a factor with growing scientific interest since the 80s. The consequences of hydrophobicity (or water repellency) in soils are multiple and resulting in increased surface runoff and creating zones of preferential flow. This causes increased soil erosion and can reach a critical volume loss of soil. Of course plants are affected as water available decreases.

There are many factors that influence increased soil hydrophobicity but it is unclear how much influence associated with each one of them. The main factors analyzed by various authors are the type of vegetation, the type of organic matter, fires, soil texture, clay content, soil moisture,...

The aim of this study was to determine the degree of hydrophobicity in soils taken under plantations of *Eucalyptus globulus* and see if there is some relation with the lithology of the substrate on the coast of Asturias. For this, samples were taken on two different lithological substrates: A) Sandstone and B) Limestone.

The hydrophobicity was measured by the Water Drop Penetration Time test (WDPT) both the mineral and organic horizon. The mineral horizon also screened to further analyze the relationship between each fraction (> 2 mm, 2 mm-400  $\mu$ , 400  $\mu$ -63  $\mu$  and <63  $\mu$ ) and soil hydrophobicity.

The results indicate that the most decisive factor in the degree of hydrophobicity of soils is the age of the plantation and not lithology. In the sample line named as A2, which is the youngest planting, hydrophilic soils are observed. The other older plantations and trees (*E. globulus*) larger (and therefore an organic horizon thicker and logical evolution as a more mature plantation) show strong or very strongly hydrophobic soils. On the other hand pH results obtained show the highest values in the younger planting, A2, coinciding with the more hydrophilic soils.

These data suggest that the extension in time of the activity of forest plantation *Eucalyptus globulus* is the direct cause both of lower pH values as increased soil hydrophobicity.

# 1. Introducción y objetivos

## 1.1. Situación geográfica:

El presente trabajo se ha centrado en dos zonas de estudio diferenciadas situadas en el norte de la Península Ibérica (Fig. 1a). Ambas zonas se localizan sobre la rasa costera en el litoral del Principado de Asturias. Se optó por elegir dos zonas de trabajo para caracterizar la hidrofobicidad de los suelos asociada a las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en dos substratos geológicos claramente distintos.

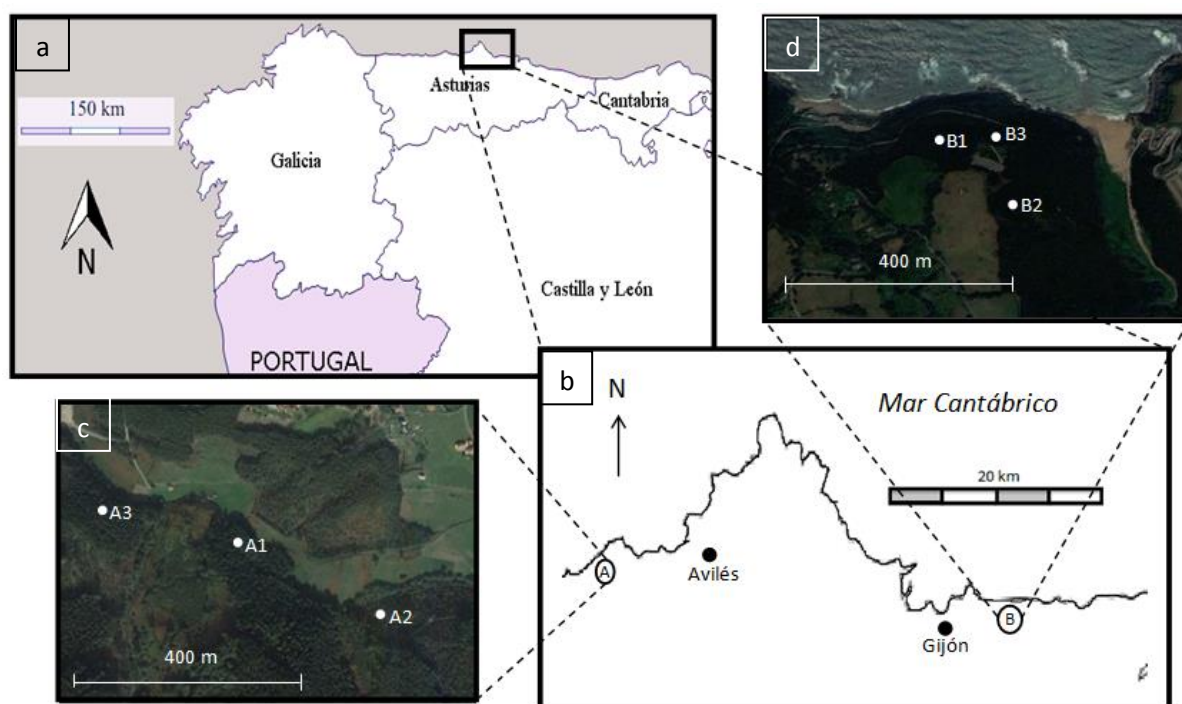


Figura 1: a) Mapa del noroeste de la Península Ibérica. b) Detalle de la línea de costa Asturiana con la ubicación de las zonas A y B donde se han tomado las muestras para este estudio. c) Situación de las plantaciones forestales de la zona A. Fotografía aérea tomada de "Google Earth". d) Situación de cada una de las plantaciones forestales de la zona B. Fotografía aérea tomada de "Google Earth".

La primera zona de estudio se sitúa al oeste del cabo Peñas (zona A) y la otra al este de este mismo cabo (zona B) (Fig. 1b).

La zona A se sitúa en las inmediaciones del playón de Bayas que pertenece al concejo de Castrillón y Soto del Barco (Fig. 1b y 1c). Se encuentra al norte del aeropuerto de Asturias y la población más cercana es Bayón.

La zona B está ubicada en los alrededores de la playa de la Ñora situada en la comarca de Gijón (Fig. 1b y 1d). El arroyo de la Ñora, que atraviesa la playa del mismo nombre, es el principal divisor entre comarcas de Villaviciosa y Gijón. Las muestras han sido tomadas en las plantaciones de *Eucalyptus globulus* situadas al oeste de la susodicha playa de la Ñora.



## 1.2. Contexto geológico:

Asturias se divide a grandes rasgos en dos conjuntos de rocas geológicamente diferenciados por su edad y modo de afloramiento.

Por un lado se encuentra el conjunto más antiguo formado principalmente por rocas precámbricas y paleozoicas pre-pérmicas y ocupa la mayor parte del territorio. Este conjunto forma parte del “Macizo Hespérico” que se dividió en cinco zonas (Lotze, 1945; Julivert et al., 1972). Dos de esas zonas están presentes en el territorio Asturiano: Asturoccidental-Leonesa y la Zona Cantábrica.

### 1.2.1. Geología de la zona A

La zona A (Fig. 2) seleccionada para este estudio se encuentra dentro de la Zona Cantábrica que constituye el segmento más externo de Orogeno Hercínico de la Península Ibérica (Julivert, 1971).

La Zona Cantábrica se caracteriza por una potente sucesión formada por rocas paleozoicas.

La deformación tectónica se concentra en niveles superficiales de la corteza y se produce por la traslación de grandes volúmenes de rocas a lo largo de cabalgamientos de gran entidad. Mientras que la ausencia de magmatismo y metamorfismo es casi total (Bastida y Aller, 1995).

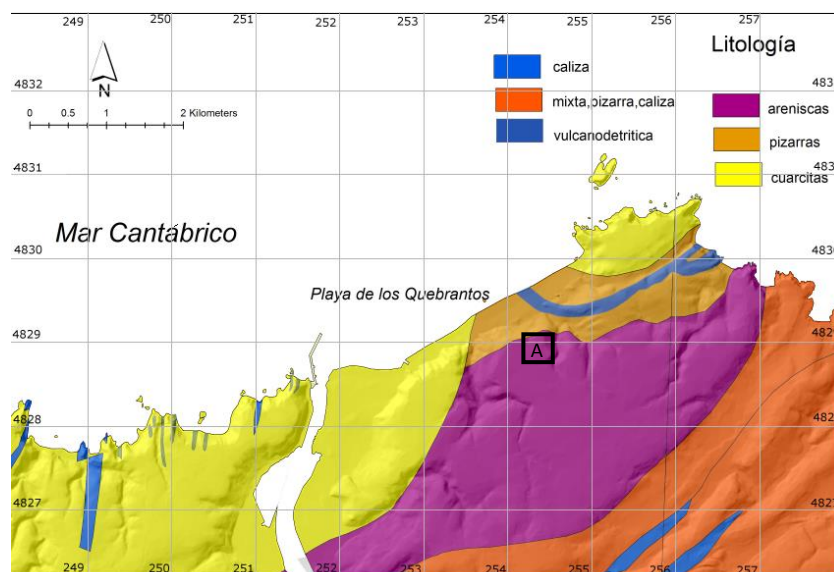


Figura 2: Mapa litológico y ubicación de la zona A.

Las muestras para este trabajo se tomaron sobre arenisca ferruginosa pertenecientes a la formación San Pedro- Furada del Silúrico superior (Wenlock- Gedinense). La formación San Pedro-Furada está constituida por alternancia de pizarras y areniscas generalmente ferruginosas. La capas más ricas en hierro son las más inferiores y comprenden bancos oolíticos de óxidos y silicatos. El espesor total de la formación es de 220-250 m de potencia máxima. Dentro de los 20-50 m más altos de la formación se encuentran faunas de Braquiópodos del Gedinense (Magna 50-13).

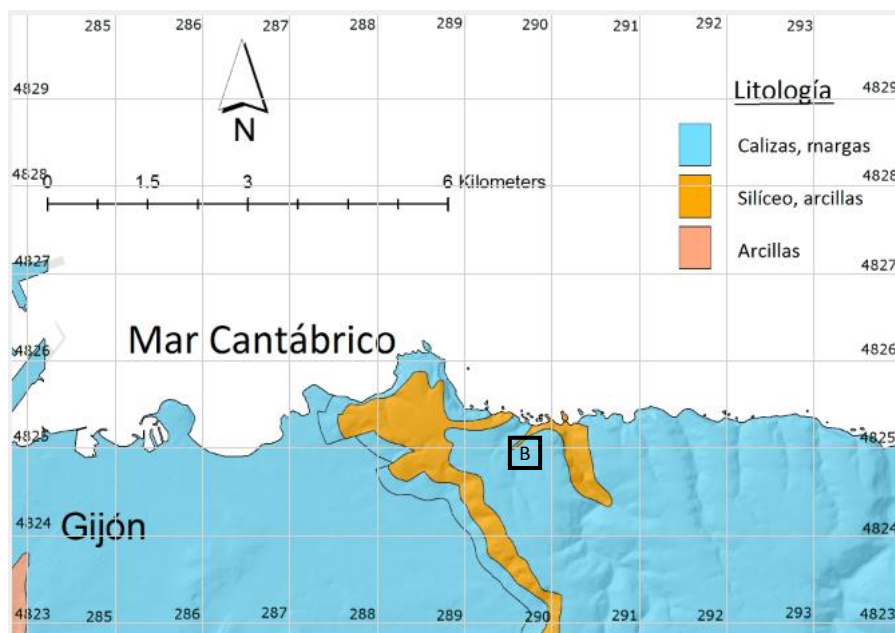
### 1.2.2. Geología de la zona B

Por otro lado se encuentra el conjunto más moderno formado por rocas pérmicas, mesozoicas y terciarias (Fig. 3). La sedimentación y su deformación constituyen el “Ciclo Alpino”.

En una primera etapa distensiva se generó una cuenca marina en el Norte de la Península Ibérica. Durante esta primera etapa tuvo lugar la sedimentación de los materiales pérmicos y mesozoicos.

En la segunda etapa, que se prolongó a lo largo del terciario, se invirtió el campo tensional pasando de un entorno distensivo a un entorno compresivo. En este momento tuvo lugar un acortamiento en dirección norte-sur que generó nuevas fallas y la reactivación de cabalgamientos Hercínicos fundamentalmente (Bastida y Aller, 1995).

A grandes rasgos la estructura cortical de la cordillera cantábrica y del margen noribérico es resultado de la deformación alpina debido al cierre parcial del Golfo de Vizcaya durante el terciario sobre la estructura cortical consolidada tras la Orogénesis Varisca (Gallastegui, 2000).



*Figura 3: Mapa litológico y ubicación de la zona B.*

Los suelos muestreados en esta zona tienen como substrato rocoso calizas pisolíticas, margas y arcillas, de edad jurásica. Concretamente forman parte del jurásico detrítico también denominado Malm.

Malm en Facies Purbeck: Al noroeste, fuera de la zona analizada y dentro de las facies Purbeck se observa una serie arenoso-margosa y fosilífera de facies salobre a transición marina. En la zona que comprende este estudio sin embargo las facies son más salobres y se componen por una serie que intercalan bancos de margas y calizas margosas, de tonos grises

y azulados. En los tramos arcillosos margosos se encuentran algunos lamelibranquios y gasterópodos, así como microfauna de ostrácodos.

### 1.3. Antecedentes:

La degradación de los suelos debido a la creciente actividad humana es un hecho que cobra cada vez más relevancia. Cada vez son más los científicos que investigan las variaciones de las cualidades tanto físicas como químicas de los suelos directamente relacionados con las diversas actividades humanas entre las que se encuentran las plantaciones forestales.

Desde tiempo histórico la idoneidad de plantaciones como las de *Eucalyptus globulus* se encuentra en entredicho. Son muchos los detractores e incluso han existido plataformas ciudadanas (ocalitos non) en contra de estas plantaciones masivas de la especie alóctona.

Son diversas las razones que se esgrimen contra esta especie en concreto. Las más repetidas aluden a la degradación del suelo: acidificación, pérdida de materia orgánica, hidrofobicidad, aumento de la erosión superficial,...y en definitiva una pérdida de suelo tanto en volumen como en calidad. Por otro lado, existe la creencia de que los eucaliptos utilizan grandes volúmenes de agua pudiendo empobrecer el reabastecimiento de acuíferos.

Sin embargo, existen trabajos científicos que aseguran todo lo contrario, que no existe degradación del suelo bajo plantaciones de *E. globulus* (Domingo-Santos, 2010).

Así, trabajos como el publicado por Domingo-Santos (2010) que no se observan cambios en el equilibrio ácido-base en los eucaliptales respecto a otras plantaciones, y que además, es una especie que contribuye de forma positiva en los ciclos de carbono.

El presente trabajo se centra en analizar cuál puede ser la influencia de las plantaciones de *E. globulus* en las propiedades hídricas de los suelos, concretamente en la capacidad de infiltración de agua que muestra un suelo. Los suelos extremadamente hidrofóbicos (que repelen el agua) causan un aumento de la escorrentía superficial, que aumenta la tasa de erosión con la consecuente pérdida de volumen de suelo. Por lo tanto la hidrofobicidad de un suelo es una cualidad a tener en cuenta para asegurar la preservación de los suelos de explotaciones agrarias y forestales.

La hidrofobicidad en un suelo puede tener implicaciones más allá del aumento de erosión superficial ya que también puede reducir la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas (Doerr S.H. et al. 2002). Además, supone un aumento necesario de volumen (y coste) de aguas de irrigación necesarias para mantener la misma tasa de producción en explotaciones agrarias.

Es evidente que una explotación maderera eucalipto o de cualquier otra especie no es comparable con un ecosistema de bosque natural. En muchas ocasiones el aterrazamiento previo a la plantación puede ayudar a minimizar la erosión superficial mejorando el sostenimiento. Hay estudios en los que se asegura que la mayor parte de nutrientes en el caso de los *E. globulus* se encuentra en el horizonte orgánico, corteza y hojas de los eucaliptos, siendo importante la restitución de los restos de poda para restituir nutrientes como P y Mg (Brañas et al. 2000, Cortez N. et al. 1998).

El litoral del Principado de Asturias es foco de discusión debido a que existe prácticamente un monocultivo de *Eucalyptus globulus* en toda la línea de costa. Según un estudio de Lago Méndez, 2007, aproximadamente el 20% de la superficie arbolada de Asturias (60 000 hectáreas) se compone de eucaliptales.

Por tanto, el objetivo principal de este trabajo es estudiar la influencia que podría tener la litología del sustrato en el grado de hidrofobicidad de los suelos bajo cultivos de *Eucalyptus globulus* en suelos no influenciados por variables del relieve como la pendiente o la orientación.

## 2. Hidrofobicidad: Causas y factores determinantes

---

### 2.1. La hidrofobicidad

En la naturaleza no existen suelos totalmente hidrofóbicos (Tschapek, 1984), esto es, que repelen el agua totalmente evitando que se infiltre en el suelo. Los suelos hidrofílicos dejan atravesar el agua formando una fina capa que se infiltra mientras que en los suelos hidrofóbicos el agua forma gotas individuales (Adam, 1963) (Fig.4).

En superficies de porosidad media, como la arena o los suelos, la infiltración del agua se inhibe. En arenas y suelos hidrofóbicos con la suficiente apertura de poros, el agua ocupa estas aperturas pero no es capaz de envolver los granos individuales en su totalidad, al contrario, en partículas hidrofílicas el agua forma una fina capa alrededor de dichas partículas (Anderson, 1986).

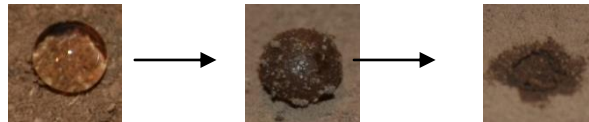


Figura 4: Fases que pasa un suelo hidrofóbico hasta que se infiltra en un suelo

La metodología en la determinación de la hidrofobicidad es relativamente reciente y debido al auge en la investigación en este campo y los múltiples trabajos que se van publicando, ha surgido la necesidad de crear un método estandarizado (Doerr et al. 1998) para la determinación de la hidrofobicidad en los suelos mediante el método Water Drop Penetration Time (WDPT).

### 2.2. Causas físico-químicas de la repelencia de agua

La afinidad o repelencia entre el agua y las partículas sólidas se originan a causa de las propias fuerzas de atracción (adhesión) y la atracción entre moléculas de agua (cohesión).

La molécula de agua tiene un átomo de oxígeno de carga parcial negativa y dos átomos de hidrógeno con carga parcial positiva. El enlace entre átomo de oxígeno y de hidrógeno se encuentran en un ángulo de  $105^\circ$  configurando el carácter altamente dipolar que tiene una molécula de agua (Parker 1987).

La atracción entre los terminales positivo y negativo hace que el agua forme agregados. El carácter dipolar del agua puede llegar a contrarrestar la atracción a superficies relativamente cargadas. Por lo tanto en el caso de que las fuerzas opuestas exteriores sean mínimas el agua (líquido) tiende a adoptar una forma esférica (gota) minimizando la superficie de contacto. Para ampliar esta superficie es necesario un trabajo relacionado con la tensión superficial que se expresa en Newton por metro (N/m). La tensión superficial del agua es sustancialmente más alta que en la mayoría de líquidos (Doerr et al. 2000). Según el artículo de Parker 1987, con el aumento de temperatura, la tensión superficial de los líquidos se reduce.

En el caso de que las fuerzas adhesivas entre sólido y agua superen las fuerzas de cohesión de la propia agua el líquido se extenderá sobre la superficie sólida. Según Tschapek (1984) todos los minerales del suelo tienen una tensión superficial mucho mayor que la del agua, por lo tanto todos los suelos son hidrófilos a priori. Sin embargo, algunos sólidos orgánicos como ceras o polímeros orgánicos pueden tener una tensión superficial inferior a la del agua, siendo hidrofóbicas (Doerr *et al.* 2000).

### *2.3. Factores que influyen en la hidrofobicidad de los suelos*

Los principales factores que influyen en la creación de suelos hidrofóbicos son: Materia orgánica y humus; Vegetación; Hongos y microorganismos; Textura y contenido en arcillas, Contenido en humedad, Incendios.

#### 2.3.1. Materia orgánica y humus del suelo:

La hidrofobicidad en los suelos, en general, suele concentrarse de manera superficial viéndose afectados unos pocos cm o dm superficiales. Es aquí donde se concentran las moléculas orgánicas que causan la hidrofobicidad (Doerr *et al.*, 2011).

Según se concluye en varios artículos (Wallis y Horne, 1992, Cuevas, J. 2006, etc) la relación entre hidrofobicidad y contenido total de materia orgánica (TOC) no es directa sino que depende del tipo de materia orgánica (calidad) y no de la cantidad total de esta.

Los componentes orgánicos que causan hidrofobicidad se dividen en dos grupos principales: 1) Hidrocarburos alifáticos y 2) Sustancias polares de estructura anfifílica.

1) Los hidrocarburos alifáticos son cadenas formadas por carbono al cual se unen átomos de hidrogeno. Son moléculas de carga neutral. Debido a esto son insolubles en el agua.

2) Las sustancias anfifílicas son sustancias polares. En un lado se comprime la cadena de carbono con carga positiva o negativa que forma una cabeza hidrofílica y en el otro extremo se forma una especie de cola hidrofóbica (las dos partes se unen con un enlace covalente). A pesar de que estas sustancias suelen disolverse en el agua tienen tendencia a unirse formando moléculas hidrofóbicas (Doerr *et al.* 2000).

En otros casos tampoco es tan evidente que la hidrofobicidad de un suelo dependa del tipo de materia orgánica sino más bien de los enlaces y la composición estructural que adopta (Doerr *et al.* 2005).

Por supuesto el régimen de descomposición también varía en el tiempo según las condiciones del entorno. La concentración de lípidos hidrofóbicos decrece con el aumento de la eficiencia en el régimen de descomposición según Diné *et al.* (1990). Un régimen de descomposición lento o un exceso de componentes hidrofóbicos debido al manejo de la vegetación son causas de un desarrollo de la hidrofobicidad (Doerr *et al.* 2000).

#### 2.3.2. Vegetación

Los estudios para determinar las sustancias hidrofóbicas con la vegetación han sido múltiples tanto en su entorno natural como en un entorno no nativo (Doerr *et al.* 2000).

En ocasiones las sustancias hidrofóbicas se relacionan con la descomposición de la vegetación (Reeder y Juergensen, 1979; McGhie y Posner, 1981) mientras que otros autores

atribuyen la creación de estos elementos a la propia actividad de las plantas en el suelo (Dekker y Ritsema, 1996a; Doerr *et al.*, 1998).

Los suelos bajo los tipos de vegetación con hojas ricas en aceites o ceras, y con gran cantidad de resina tales como arbustos esclerófilos, coníferas y eucaliptos son mucho más propensos a desarrollar una fuerte repelencia al agua que los bosques de hoja caduca (Doerr *et al.*, 2011, Doerr *et al.*, 2000,etc)).

Las especies de árboles que se relacionan con la hidrofobicidad se han recopilado en el artículo de Jaramillo 2006 y son los siguientes: *Acacia*, *Acer*, *Banksia*, *Carya*, *Citrus*, *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Juniperus*, *Larix*, *Picea*, *Pinus*, *Populus*, *Pseudotsuga*, *Quercus* y *Tsuga*.

También se han observado suelos repelentes en pastos de hierba y bajo arbustos (Doerr *et al.*, 2000). En algunas plantaciones de cereales se ha observado repelencia al agua que algunos autores como Scott (1992) atribuyen a una posible competencia del propio cereal para evitar que germinen plantas alrededor que pudieran quitarle el agua.

### 2.3.3. Hongos y microorganismos del suelo:

En ocasiones la repelencia al agua no tiene relación directa con un tipo de vegetación, sin embargo el tipo de vegetación se relaciona directamente con ciertos hongos y microorganismos que pueden ser la causa de la hidrofobicidad de un suelo (Doerr *et al.* 2000).

Los hongos y microorganismos pueden aumentar (mediante la creación de residuos hidrofóbicos) o disminuir la hidrofobicidad (mediante la descomposición de material hidrófobo) (Roper, 1998).

Los microorganismos relacionados más frecuentemente con la repelencia de agua son: *Amanita muscaria*, *Amanita vaginata*, *Aspergillus sydowi*, *Cortinarius sp*, *Fusarium sp*, *Lactarius deliciosus*, *Marasmius oreades*, *Penicillium nigricans*, *Piloderma bicolor*, *Rhizopogon vinicolor*, *Russula sp* y *Trichoderma sp* (Jaramillo 2006).

### 2.3.4. Textura del suelo y contenido en arcillas:

Los suelos con textura más gruesa son más susceptibles al desarrollo de la repelencia de agua que las texturas más finas. Esto se debe a que en texturas más gruesas la superficie de las partículas es menor pudiendo ser cubiertas con más facilidad por sustancias hidrofóbicas (Doerr *et al.*, 2011).

Hay múltiples artículos que determinan la relación entre repelencia al agua con materiales gruesos en suelos arenosos (Roberts y Carbon, 1971; Wilkinson y Miller, 1978; McGhie y Posner, 1980; DeBano, 1991, Crockford *et al.*, 1991). En el artículo de Crockford *et al.*, (1991) se determina una relación positiva entre en aumento del tamaño de partícula y la hidrofobicidad.

También se ha determinado que la adición de arcillas a un suelo reduce la repelencia al agua según Cann y Lewis (1994) aunque por el contrario se han encontrado suelos con hasta un 40% de arcillas extremadamente hidrofóbicas (Crockford *et al.*, 1991).



En trabajos como el llevado a cabo por Doerr *et al.* (1996) por ejemplo, los suelos con fracciones más finas son tan o más hidrofóbicas que los suelos con grano más grueso.

Por lo tanto, se hace imposible determinar que un suelo con una textura determinada es hidrofóbico o hidrofílico ya que existe una gran variabilidad de factores a tener en cuenta.

#### 2.3.5. Contenido en humedad del suelo:

La hidrofobicidad de un suelo no es una constante, sino que muestra una variabilidad que depende en gran medida de la humedad del propio suelo. Incluso se puede hablar de estacionalidad ya que en épocas de más lluvia (invierno) la humedad presente en el suelo es mayor que en épocas más secas del año (verano). Sin embargo, hay múltiples estudios realizados en todo el mundo y en todo tipo de climas que muestran la existencia de suelos hidrofóbicos (Neris *et al.* 2012, Aelamanesh *et al.*, 2014, Zavala *et al.* 2014, Rwanza *et al.* 2013)

En un estudio realizado durante 16 meses en Portugal bajo plantaciones de *E. globulus* han determinado que las áreas con suelos invariablemente repelentes contienen una humedad por debajo del 14% mientras que los suelos hidrofílicos contienen una humedad por encima del 27% (Leighton-Boyce *et al.* 2005).

Hay estudios como (Sheunesu Rwanza *et al.* 2013) que han concluido que los suelos bajo explotaciones de eucaliptos tienen más contenido en humedad que suelos bajo pastos u otro tipo de vegetación. Esto puede deberse por un lado, a que las raíces de estos árboles pueden llegar a 3m de profundidad y crecer hasta 2,5m en horizontal pudiendo alcanzar el nivel freático. Por otro lado puede deberse a la acumulación de hojarasca y desechos orgánicos propios de los árboles de eucaliptos que se acumulan en la superficie minimizan la evaporación superficial del agua de lluvia favoreciendo su infiltración.

Tras un incendio y en condiciones de baja humedad la hidrofobicidad es más pronunciada pero si las condiciones son de alta humedad prolongada el suelo puede perder la repelencia de agua por completo (Doerr *et al.*, 2011).

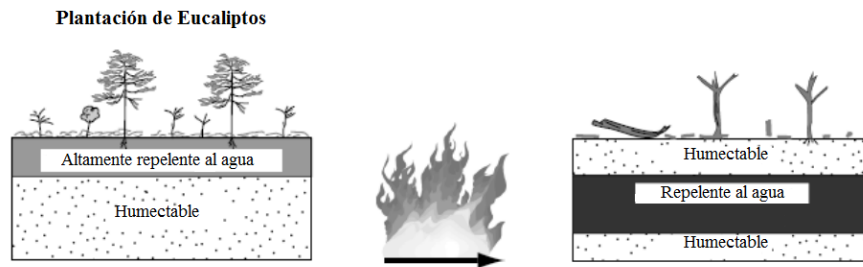
#### 2.3.6. Incendios:

En condiciones normales (sin quemar) la repelencia al agua es normalmente más fuerte en la superficie del horizonte mineral (Huffman *et al.* 2001). La quema puede variar en gran medida la magnitud y profundidad de la repelencia del agua (Doerr *et al.*, 2011) (Fig. 5).

Durante un incendio los componentes orgánicos se volatilizan y condensan en el suelo induciendo o intensificando la hidrofobicidad. En incendios de elevada temperatura sin embargo los compuestos orgánicos pueden destruirse totalmente dejando unos suelos perfectamente humectables (Doerr *et al.*, 2011).

Tras los incendios forestales se dan las condiciones idóneas (capas hidrofóbicas, ausencia o disminución de cubierta vegetal,...) para un aumento de la escorrentía superficial y por lo tanto el aumento de la tasa de erosión y en consecuencia pérdida de suelo.





*Figura 5: Imagen esquemática donde se muestra el efecto que tienen los incendios en los suelos repelentes bajo plantaciones de eucaliptos (Doerr et al., 2011).*

Los incendios además producen cambios significativos en las propiedades de los suelos haciendo variar el pH, contenido en carbono orgánico y textura del suelo según Granged *et al.* (2011). En este artículo determinan que los suelos hidrofóbicos pueden convertirse en suelos perfectamente humectables tras incendios de alta intensidad. En este caso atribuyen la destrucción de la repelencia al agua a una fuerte reducción de la materia orgánica causada por el propio fuego. Por otro lado, los incendios de baja intensidad generan o incrementan la repelencia al agua de los suelos (Tabla I). También concluyen que en la erosión tras incendios de alta intensidad se pierde contenido de arcillas.

Temperatura del incendio	<175°C	175°C-200°C	280°C-400°C
Repelencia al agua	Poca variación de la repelencia	Aumento de la repelencia	Destrucción de la repelencia

*Tabla I: Variabilidad de la repelencia de agua en los suelos respecto a la temperatura de los incendios obtenidos de Jaramillo (2004)*

#### 2.4. Erosión de suelos causados por la hidrofobicidad

Como es sabido son muchos los factores que influyen en la erosión de los suelos. Por esta razón es complicado aislar la relación directa de la erosión con la hidrofobicidad del suelo. Además la propia hidrofobicidad depende de muchos factores y varía temporalmente.

Sin embargo, hay trabajos como el de Shakesby *et al.* (2000) que tratan de discernir el impacto que tiene la hidrofobicidad en la erosión de los suelos. Para este propósito efectuaron un experimento para aislar al máximo tres factores determinantes (Fig. 6):

- 1) Régimen temporal: La hidrofobicidad de un suelo varía dependiendo de las condiciones externas (humedad ambiental, temperatura episodios de lluvias, incendios, etc), no es constante.
- 2) Posición: La profundidad a la que se encuentra la superficie hidrofóbica puede variar el régimen de erosión.
- 3) Continuidad espacial: La superficie de la capa hidrofóbica varía, al igual que el régimen temporal, dependiendo de las condiciones externas.

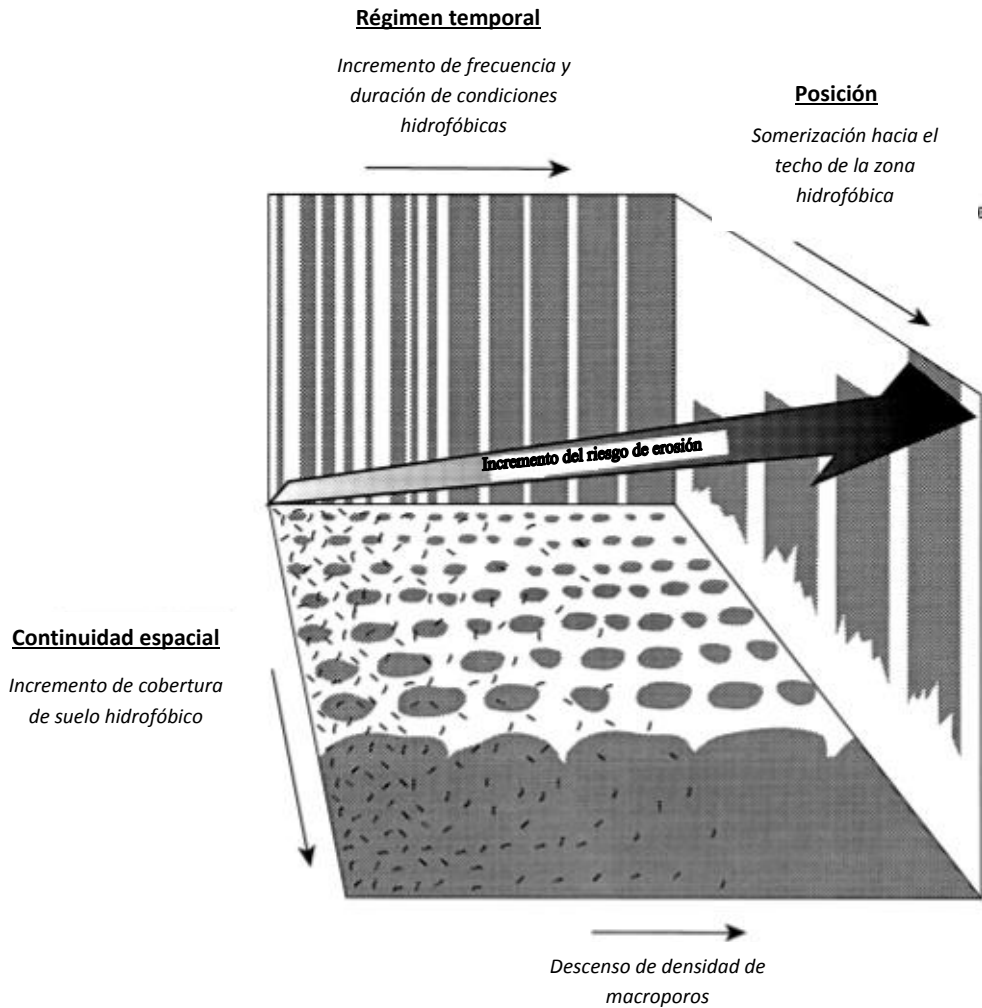


Figura 6: Esquema tomado de Shalesby et al. (2000) mostrando los factores (relacionados con la hidrofobicidad) que determinan el ratio de erosión.

## 2.5. Posibles soluciones a la hidrofobicidad

Hay diversas publicaciones que comentan la existencia de productos utilizados para humectar el suelo eliminando la hidrofobicidad como DeBano (1981), que comenta el uso de estos para evitar la escorrentía superficial debido a la creación de capas hidrofóbicas desarrolladas tras un incendio. O el artículo de Müller *et al.* (2011) que analiza y resume todas las opciones posibles para ponerle remedio a la repelencia del agua y evalúa sus efectos y desventajas que se resumen en la Tabla II.

Estrategias	Remedios	Desventajas	Efectividad	Efectos adversos
Químicas indirectas	Sulfactantes	Coste alto por la necesaria aplicación continuada	SI	Contaminación de aguas. Posibles efectos en la estructura de los suelos y comunidades biológicas. Phytotoxicidad
	Adición de arcillas	Coste, si no hay arcilla disponible en las inmediaciones	SI	Cambios en la estructura del suelo, compactación, inmovilidad del cobre
Químicas directas	Liberación lenta de fertilizantes	Coste, no tiene éxito en campo	NO	Desconocidos

	Encalado	Costes	NO	Desconocidos
	Fungicidas	Costes	SI	No es siempre efectivo, Riesgo medioambiental (trasporte a reservas de agua)
<b>Biológicas directas</b>	Bio-remediación	Costes, aplicación no practica	NO	
	Estimulación de lombrices	Costes, aplicación	NO	Fertilidad de los suelos
	Vegetación seleccionada	No siempre factible	SI	Puede provocar cambios en el sistema de uso de los suelos
<b>Física directa</b>	Irrigación	Costes, disponibilidad de agua	SI	Ninguno
<b>Físicas indirectas</b>	Cultivo	Efectos a corto plazo	SI	Erosión, emisión de gases de efecto invernadero
	Aireación del suelo	Efectos a corto plazo y mucho trabajo	SI	Desconocidos
	Compactación	No es muy efectivo	NO	Cambios en la estructura y calidad del suelo

*Tabla II: Tabla modificada a partir de la tabla presente en el artículo Müller et al.( 2011). En ella se describen los posibles remedios para evitar la repelencia al agua de los suelos testados en el susodicho artículo.*

## 3. Materiales y métodos

---

### 3.1. Descripción de las parcelas

#### 3.1.1. Vegetación que forma el sotobosque

Se han seleccionado seis parcelas tres en suelos de arenisca (A1, A2, A3) y tres en substrato carbonatado (B1, B2, B3).



Figura 7: Plantaciones forestales de la zona A de la especie *Eucalyptus globulus* (sustrato arenisca). De izquierda a derecha: A1, A2 y A3.

**A1:** Se trata de una parcela con alta densidad de sotobosque. Los ejemplares de eucaliptos llegan a tener perímetros de tronco de hasta 120 cm.

El sotobosque se compone de helechos, hiedras, tocones y retoños de pinos principalmente (Fig.7).

**A2:** Ésta parcela muestra una densidad mucho menor que el resto de plantaciones analizadas para este estudio. Los ejemplares de *E. globulus* tienen un tamaño pequeño y son mucho más jóvenes.

El horizonte orgánico se encuentra cubierto por hierba. Se encuentran puntualmente zonas con helechos y zarzas poco desarrolladas, así como tojos de pequeño tamaño (50cm de altura máxima). Es el único bosque analizado que presenta principalmente hierba ya que en los demás el sotobosque está tan desarrollado que no permite el crecimiento de este tipo de plantas (Fig. 7).

**A3:** El sotobosque se compone por helechos, hiedras, zarzas principalmente. Puntualmente se encuentran zonas con gramíneas coincidiendo con zonas de más claridad entre los *E. globulus*.

El perímetro de los troncos es de máximo 90cm y en ningún caso llegan al metro en los ejemplares medidos alrededor de la línea de muestras (Fig. 7).



*Figura 8: Plantación forestal de Eucalyptus globulus B (sustrato caliza). De izquierda a derecha: B1, B2 y B3.*

La vegetación que forma el sotobosque sobre el sustrato de caliza correspondiente a las plantaciones de la zona B es la siguiente:

**B1:** Los ejemplares de eucaliptos son de gran tamaño llegando a tener perímetros de tronco de hasta 2m. Esta plantación es posiblemente la más antigua analizada en este trabajo, teniendo en cuenta el tamaño (diámetro y altura) de los ejemplares medidos (Fig. 8).

El sotobosque está muy desarrollado incluso llegando a impedir el paso por completo. Las especies que lo componen son múltiples, helechos, zarzas, tojos, hayas e incluso ejemplares de robles comunes. Los helechos alcanzan una gran altura llegando a medir hasta 2m.

**B2:** El sotobosque está desarrollado y hay ejemplares de retoños de roble y haya. Además hay abundantes helechos y zarzas (Fig.8).

El perímetro de los troncos de eucalipto máximo medido en la línea de muestras es de 1,12 m.

**B3:** El sotobosque está formado principalmente por helechos de aproximadamente 1,5m, tojos y zarzas (Fig. 8).

El perímetro de los arboles no llega al metro de longitud. El perímetro de tronco máximo medido alrededor de la línea de muestras es de 95cm.

### *3.2. Toma de muestras:*

En total se obtuvieron 228 muestras de las cuales 115 corresponden al horizonte mineral y 113 al horizonte orgánico (el número es menor porque algunos puntos de muestreo carecían de horizonte orgánico).



*Figura 11: a) Extracción del anillo metálico con la muestra. B) muestra extraída del anillo metálico. Se diferencian perfectamente el horizonte orgánico superior del horizonte mineral inferior c) Muestras embolsadas y ordenadas listas para analizar en el laboratorio.*



Las muestras se tomaron durante los fines de semana de septiembre y octubre de 2015.

Se procuró que las pendientes de los bosques elegidos fuesen los más suaves posibles (<30°) y más o menos parecidas en todas las parcelas. Las variables del relieve en especial pendiente y orientación, podrían tener una influencia importante en los parámetros analizados. La inclusión de estas variables en el diseño experimental hubiera generado un volumen de muestras muy elevado y se pensó que podrían ser objeto de posteriores estudios

En cada una de las zonas se seleccionaron tres bosques diferenciados con plantaciones de *Eucalyptus globulus*. Las explotaciones forestales elegidas fueron plantadas en diferentes momentos pero en un mismo entorno climático y litológico (3 en arenisca y 3 en caliza).

En cada uno de las plantaciones se han tomado muestras en 20 puntos a lo largo de un transecto (excepto en el transecto 1 que se tomaron 15 muestras ya que un argayo impedía continuar muestreando en esa dirección). Las líneas de muestreo (transectos) se situaron perpendiculares a la pendiente en cada plantación. Las muestras se tomaron aproximadamente cada 150 cm de distancia de una a otra. En algunos casos era inviable tomar muestras a la distancia exacta debida principalmente a la densidad del sotobosque o la ubicación de algún ejemplar de eucalipto. En cada uno de los 20 puntos de muestreo se tomaron dos muestras; una correspondiente al horizonte orgánico superior (HO) y otra del horizonte mineral (HM) subyacente.

En un inicio se midió el espesor de la hojarasca en cuatro puntos alrededor del punto de muestreo y se retiró antes de obtener la muestra de horizonte orgánico definitiva.

Para obtener las muestras se utilizó un anillo metálico de 5 cm de diámetro que se introdujo en el suelo mediante presión (Fig. 11a). El horizonte orgánico se tomó en su totalidad y se apuntó su espesor. Por otro lado, se seleccionaron los 2.5 cm superiores del horizonte mineral. Todas las muestras se etiquetaron debidamente se pesaron y se almacenaron (Figuras 11b y 11c).

Para completar la información se apuntó también el perímetro de los arboles más cercanos y la distancia desde estos hasta el punto de muestreo.

Se tomaron fotografías de las plantaciones y de las muestras obtenidas en el momento de recogerlas, así como información complementaria como la inclinación del terreno, el tipo de sotobosque, las coordenadas de los puntos de muestreo.

Todas las muestras se secaron al aire durante tres meses.

### *3.3. Tratamiento en el laboratorio:*

#### *3.3.1. Secado*

En un principio se procedió a secar las muestras del horizonte mineral. Todas las muestras de este horizonte se secaron en estufa durante siete días a 45°C (Fig. 12a). Tras este proceso de secado se pesó cada una de las muestras para determinar el grado de humedad presente en cada uno de los suelos (Figuras 12b y 12c).



Figura 12: a) estufa de secado con muestras correspondientes al horizonte mineral b) muestras secas del horizonte mineral c) Pesaje de muestras secas para determinar la humedad del horizonte mineral.

Dado que hay múltiples autores que opinan que el propio secado de las muestras dota de carácter hidrofóbico a las muestras se optó por secar únicamente las muestras correspondientes al horizonte mineral. Esto se llevó a cabo para seguir el proceso lo más parecido posible a la estandarización del método WDPT llevado a cabo por Doerr et al. (1998).

Por lo tanto, las muestras correspondientes al horizonte orgánico se secaron al aire durante 4 meses y no se secaron en la estufa para conservar las propiedades de este horizonte lo más inalterados posibles.

### 3.3.2. Determinación del grado de hidrofobicidad

Tras el secado se procedió a tamizar todas las muestras con un tamiz de 2 mm (este proceso se utiliza para evitar que los clastos grandes o fragmentos grandes de hojas o raíces falseen el grado de hidrofobicidad ya que una gota jamás las atravesaría un grano mineral sólido). Se pesó la fracción >2mm de cada muestra.

Siguiendo el procedimiento indicado en el artículo Doerr *et al.* 1998 Se procedió a preparar las muestras para medir el grado de hidrofobicidad de cada una de las ellas. El método elegido para llevar a cabo el experimento es el Water Drop Penetration Time test (WDPT). Existe otro método utilizado que se denomina Molarity of an Ethanol Droplet (MED) que no se ha llevado a cabo para este artículo. Sin embargo en el artículo de Doerr *et al.* 1998 han tratado de correlacionar ambos métodos para unificar los resultados obtenidos para una mejor comprensión de los mismos (Tabla IV).

Segundos en infiltrarse	<5	5-10	10-30	30-60	60-180	180-300	300-600	600-900	900-3600	3600-18000	>18000
Grados de Hidrofobicidad WDPT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Grados de Hidrofobicidad MED	1	2		3	4		5		6	7	

Tabla IV: Correlación entre los grados de hidrofobicidad medidos con los dos métodos: WDPT y MED. La clasificación del método MED tiene siete rangos diferenciados = 1: Muy hidrofílico 2: hidrofílico 3: Ligeramente hidrofóbico 4: Moderadamente hidrofóbico 5: Fuertemente hidrofóbico 6: Muy fuertemente hidrofóbico 7: Extremadamente hidrofóbico

Antes que nada se acondicionó una habitación de pequeño tamaño con un deshumidificador y un sensor de temperatura y humedad ambiental.

Con el objetivo de obtener los mejores resultados se mantuvo constante la humedad ambiental, así como la temperatura del laboratorio. Como determinan en el artículo Doerr *et al.* (1998) el grado de hidrofobicidad de un suelo varía considerablemente de una estación del año a otra debido al cambio de regímenes de lluvias, nivel de evapotranspiración y en definitiva a las condiciones climáticas dominantes por lo que la temperatura y humedad ambiental pueden variar los resultados del test WDPT.

En este caso el experimento se efectuó a  $50\% \pm 5\%$  de humedad y  $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Las muestras se introdujeron en unos porta-muestras cilíndricos de plástico y se dejaron 24h para que se adaptaran a la humedad y temperatura del laboratorio.

Para obtener una estadística fiable se utilizaron cinco gotas de agua destilada por cada muestra (Fig. 13). Para formar las gotas se utilizó agua destilada y un cuentagotas. Se procuró mantener la distancia, el ángulo y la cantidad de agua (gota media 63,5 ml) lo más semejante posible durante todo el experimento. Estos factores (distancia, ángulo y volumen de agua) pueden variar los resultados ya que afectan al tiempo de penetración del agua en el suelo.

Por último se cronometró el tiempo de penetración de cada gota de agua en la muestra de suelo y se anotó para su posterior análisis. Para determinar el grado de hidrofobicidad se calculó la mediana del grado de hidrofobicidad obtenido para las cinco gotas de cada muestra.

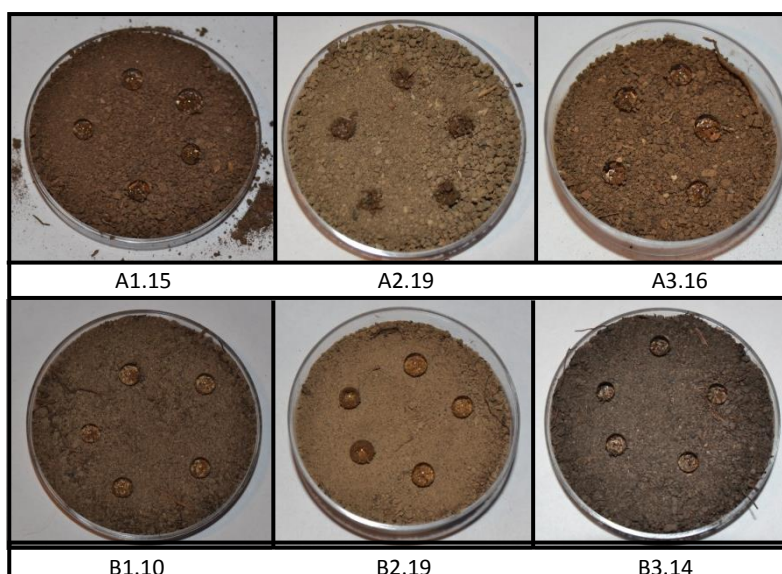


Figura 13: Imágenes del proceso de determinación del grado de hidrofobicidad en una muestra de cada línea de muestras.

Por otro lado tras leer varios artículos (Doerr *et al.*, 1998) que aseguran que la humedad presente en los suelos es un factor determinante en el grado de hidrofobicidad de los suelos se decidió preservar la integridad de las muestras correspondientes al horizonte. Por esta razón se evitó secarlas en la estufa como se hizo con el horizonte mineral. Las muestras del horizonte orgánico se secaron al aire para alterar sus propiedades lo menos posible y se procedió a determinar el grado de hidrofobicidad de cada una repitiendo el mismo procedimiento WDPT seguido con el horizonte mineral.



### 3.3.3. Tamizado



*Figura 14: a) Torre de tamizado b) Tamices utilizados con las fracciones correspondientes a la muestra A3.3. c) Pesaje de fracción de tamaño grava (>2mm).*

Tras determinar estos parámetros se procedió a tamizar el horizonte mineral. Para ello se utilizó una torre de tamizado con los siguientes tamices: 2mm, 400 $\mu$ , 63 $\mu$  y se pesó cada fracción (fig. 14). Se determinó el peso de cada fracción en cada una de las muestras: gravas >2 mm, arenas gruesas 2 mm<400  $\mu$ , arenas finas 400  $\mu$ <63  $\mu$ m y por último la fracción fina compuesta por limos y arcillas y se determinó el porcentaje (%) que ocupaba cada fracción respecto al total de la muestra.

En este caso no se tamizaron las muestras del horizonte orgánico para preservar la muestra por las razones ya comentadas.

### 3.3.4. Total Organic Carbon (TOC)



*Figura 15: a) Muestras enfriándose en la desecadora de vidrio. b) Imagen de la mufla en su totalidad preparada a 450<sup>0</sup>C. c) Crisoles con las muestras dentro de la mufla. d) Crisoles con las muestras tras salir de la mufla después de quemar todo el carbono orgánico presente en ellas.*

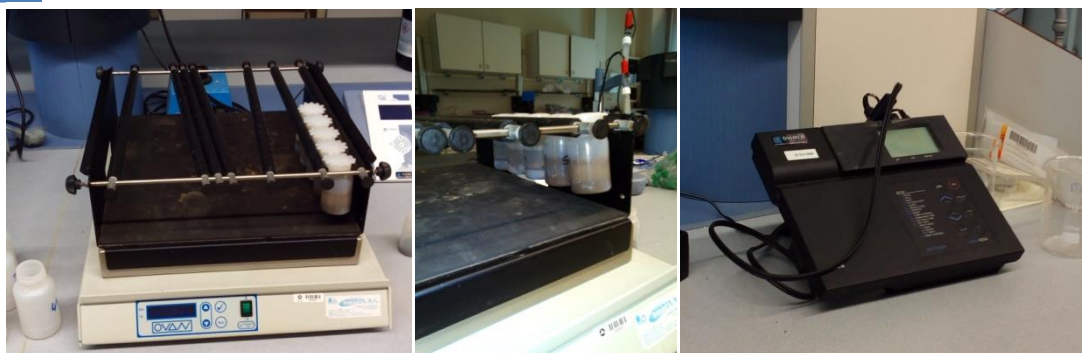
Con el objetivo de analizar el porcentaje de materia orgánica total (TOC) se procedió a seleccionar las muestras más representativas teniendo en cuenta principalmente el grado de hidrofobicidad presente en cada una de ellas. Por esta razón se seleccionaron 3 muestras de horizonte mineral hidrofílicas o de bajo grado de hidrofobicidad y otras 3 muy hidrofóbicas.

Tras seleccionar las muestras se secaron los crisoles (vacíos) en una estufa a 65°C para eliminar cualquier rastro de humedad. Tras pesar los crisoles de porcelana vacíos, se pesaron 3 gramos de muestra y se introdujeron en cada crisol, previamente numerado. Se volvió a introducir en la estufa a la misma temperatura durante 24h hasta eliminar toda la humedad de

la muestra. Después de sacar cada muestra de la estufa se dejó enfriar en una desecadora de vidrio para que la muestra no absorbiese humedad ambiental (Fig. 15a) y se pesó. En la última etapa se preparó la mufla poniéndola a 450°C de temperatura (Fig. 14b). Una vez alcanzada la temperatura se introdujeron los crisoles con la muestra dentro de la mufla (Fig. 14c) y se esperó 5 horas a que toda la materia orgánica se quemase. Una vez pasado este tiempo se repitió la operación de enfriamiento con la desecadora (Fig. 14d) y al final se pesaron los crisoles.

Así se calculó el porcentaje de carbono orgánico total presente en la muestra. Además se realizaron duplicados de cada una de las 6 muestras (3en arenisca+3en caliza) para dotar de más entidad a los resultados.

### 3.3.5. pH



*Figura 16: a) preparación en centrifugadora de las muestras diluidas b) detalle de las muestras en la lechera dentro de la centrifugadora. C) Aparato de medición del pH.*

Las últimas propiedades analizadas para este trabajo son el pH y la conductividad eléctrica. Para ello se seleccionaron las muestras más representativas de la variabilidad teniendo en cuenta los parámetros anteriormente medidos (grado de hidrofobicidad).

Por esta razón se optó por analizar las 6 muestras en las que se analizó el contenido total de materia orgánica (TOC) ya que, como se ha explicado anteriormente en la metodología llevada a cabo para medir el TOC, se seleccionaron estas muestras dada su representatividad. Tres muestras son extremadamente hidrofóbicas (B2.4, B2.10 y B2.12). Y las tres restantes que son de carácter hidrofílico o de baja hidrofobicidad (A2.1, A2.9 y A2.19). Por otro lado, se optó por sumar a estas seis muestras otro par de muestras de cada uno de los transectos restantes. Así se analizaron otros 4 pares de muestras: A1.1 y A1.8, A3.1 y A3.11, B1.1 y B1.6 y por ultimo B3.5 y B3.18. con el fin de discernir la relación entre el pH y la litología del sustrato (si la hubiera).

Para analizar el pH se pesaron cinco gramos exactos de cada una de las muestras seleccionadas. Los cinco gramos se introdujeron en las lecheras disponibles en el laboratorio y se etiquetó cada una de ellas. Después se añadieron 12.5 ml de agua desionizada medidos mediante una probeta. Una vez obtenida la suspensión en una proporción 1:2,5 se centrifugó a 3000 rpm 3 veces dejando reposar el preparado 5 minutos entre cada centrifugado (Fig. 16a y 16b).

Por último, con un medidor de pH calibrado se midió el pH de cada muestra insertando el detector del ph-metro en la disolución (Fig. 16c). Una vez estabilizado el valor del pH en la pantalla se anotó en el cuaderno de laboratorio.

Antes de medir la muestra siguiente se enjuagó el detector de pH con agua desionizada para no contaminar la muestra siguiente. Esto se hizo para cada una de las medidas realizadas.

### 3.3.6. Conductividad eléctrica (CE)



*Figura 17: a) Fotografía de muestras en la centrifugadora. b) Muestras en las lecheras preparadas para medir la conductividad eléctrica y aparato de medición c) Midiendo la CE de las muestras.*

El procedimiento para medir la conductividad eléctrica es muy similar a la medición de pH y se utilizó la misma muestra preparada para la medición de este parámetro.

Para medir la conductividad eléctrica de las muestras se tomó la muestra ya preparada para medir el pH, esto es, cada muestra diluida al 1:2,5 y se le añadieron otros 12.5 ml de agua desionizada mediante una probeta. Tras añadir el agua se obtuvo una disolución final al 1:5.

Una vez obtenida la disolución en la concentración deseada se repitió el proceso de centrifugado de las lecheras. El centrifugado se programó a 3000 rpm (Fig 17a) y se repitió el proceso 3 veces cada 5 minutos para asegurar que la muestra se diluyese de forma correcta asegurando una medida representativa de la salinidad presente en cada uno de los suelos. Por último, se sumergió el detector del conductivímetro bien calibrado en la lechera y se esperó hasta que el valor correspondiente al CE apareciese constante en la pantalla (Fig. 17b y 17c). Como en el caso de medición del pH, el detector se enjuagó con agua destilada en cada cambio de muestra a analizar para no contaminar los resultados.

### 3.3.7. Análisis estadísticos

. Los datos obtenidos previamente se procesaron mediante el programa informático “Statistics”. Para conocer el grado de relación entre las variables, se procedió a hacer un análisis de regresión múltiple. Para ello, se utilizó el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r). El coeficiente de correlación mide el grado de asociación entre dos variables y el sentido de su relación (positivo o negativo). El coeficiente de correlación indica la magnitud de la relación encontrada entre dos variables.

Los datos se distribuyeron en tres análisis diferenciados:

- 1) Las variables introducidas en el programa fueron: Los datos de los resultados obtenidos respecto al grado de hidrofobicidad en ambos horizontes (por un lado, los

datos del horizonte orgánico y por el otro los del horizonte mineral). Además se sumaron los datos referentes a cada una de las fracciones minerales obtenidas tras el tamizado ( $>2\text{mm}$ ,  $2\text{mm}-0.4\text{mm}$ ,  $0.4\text{mm}-0.064\text{mm}$  y  $<0.064\text{mm}$ ).

2) Se utilizaron las mismas variables pero utilizando solo los datos de las plantaciones sobre sustrato de arenisca (líneas de muestras A1, A2 y A3).

3) Por último se hizo un tercer análisis con las mismas variables pero utilizando únicamente los datos referentes a las plantaciones sobre sustrato de caliza (líneas de muestras B1, B2 y B3).

## 4. Resultados y discusión.

### 4.1. Relaciones entre parámetros medidos “in situ” en cada parcela

Transectos	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Inclinación del terreno	15 SW	22 SW	10 SW	25 SW	20 NE	5N
Espesor medio horizonte orgánico (cm)	4,465	<u>1,185</u>	1,85	<u>6,2</u>	3,5	5,65
Humedad del suelo (%)	13,5	13,7	12	6,6	3,5	6,6
Color (Tabla Munssel)	10YR 5/2-4/1	10YR 5/3	10YR 3/2-4/2	2,5 Y 5/2	2,5Y 5/2	2,5Y 4/1
Espesor medio hojarasca (cm)	1,04	<u>0,17</u>	0,37	0,96	0,67	0,23
Perímetro medio de tronco de <i>E. globulus</i> (cm)	44,31	<u>29,375</u>	32,06	<u>67,74</u>	35,945	43,295

Tabla III: Valores medios de los parámetros medidos “in situ” en cada parcela.

Las muestras de suelo tomadas en sustrato de arenisca muestran de forma generalizada valores medios inferiores en el espesor de horizonte orgánico. Este horizonte está más desarrollado en las plantaciones de la zona B, con sustrato calizo. Además, en la parcela A2 se observa una plantación forestal muy joven, la más joven de todas las plantaciones. Tanto la altura como el perímetro de los troncos de *E. globulus* son muy inferiores al resto de zonas muestreadas (Fig. 9). Esto se refleja a su vez en el escaso espesor de hojarasca y en consecuencia a la inmadurez del horizonte orgánico (HO) cuyo espesor es de media de 1,185 cm (Tabla III).

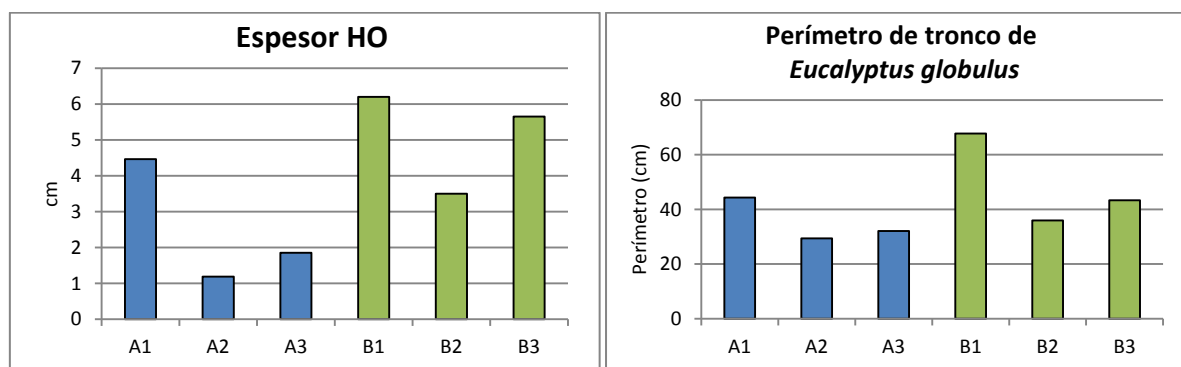


Figura 9: A la izquierda el gráfico que muestra el espesor medio del horizonte orgánico (HO) de cada línea de muestras. A la derecha, gráfico que muestra la media de todos los perímetros de troncos de eucaliptos medidos a lo largo de cada una de las líneas de muestras

Como se observa en las gráficas de la Figura 9 la relación entre espesor del HO y perímetro de trocos es coincidente. El valor más bajo corresponde en ambos a la línea de muestras A2 y los valores más altos a la línea de muestras B1.

En general, el horizonte orgánico muestra mayor espesor en las plantaciones con sustrato calizo (Fig.10). La causa principal podría ser la edad de la propia explotación forestal. El perímetro de los troncos de *E. globulus* muestra que en general, las plantaciones situadas en la zona de muestreo A son más jóvenes que los situados en la zona B. Además se observa una concordancia entre el tamaño de los árboles y el espesor del horizonte orgánico. En la Figura 10 podemos observar que el espesor del horizonte orgánico en la línea A1 es el mayor de la zona A. Es lógico pensar que con el mismo



clima y el mismo tipo de sustrato rocoso como de plantación, el horizonte orgánico estará más evolucionado en las plantaciones más antiguas.

La humedad del suelo en general es más alta en los suelos de la zona A, siendo más del doble de porcentaje en volumen de agua.

Respecto al color en la zona A los suelos son más grisáceos respecto a la zona B que tiene un tono más rojizo en términos generales.

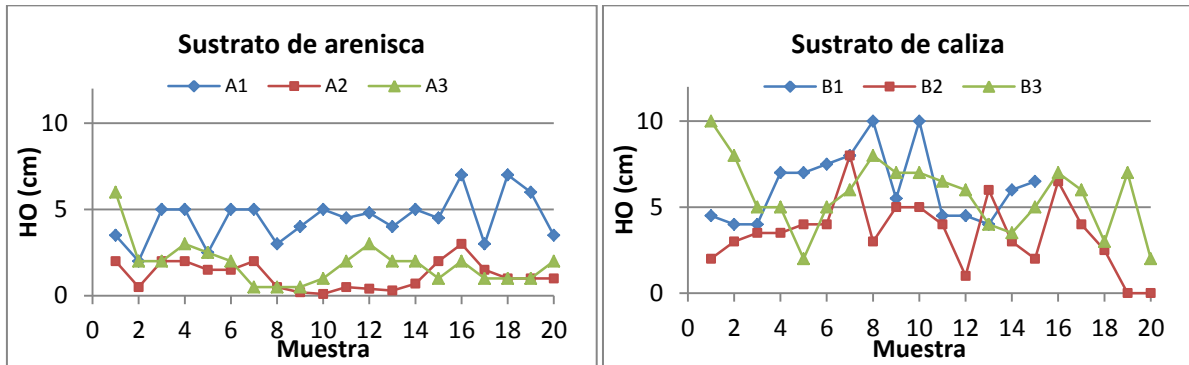


Figura 10: Perfiles del espesor del horizonte orgánico (HO) de cada una de las líneas de muestras. En el gráfico de la izquierda se representa el espesor del HO sobre sustrato formado por arenisca (líneas A1, A2 y A3) y en el de la derecha sobre sustrato formado por caliza (líneas B1, B2 y B3).

## 4.2. Parámetros medidos en laboratorio

### 4.2.1. Contenido en humedad:

El contenido en humedad de las muestras recién cogidas es mayor en los suelos sobre sustrato de arenisca (A) que en los suelos con sustrato calizo (B) (Fig. 18).

La media de humedad de todas las muestras pertenecientes a la zona A o sustratos en areniscas es de 13,1% del volumen total de la muestra frente al 5,5% de humedad media en las muestras de la zona B o sustratos de calizas. Por lo tanto, la humedad en la zona A es más del doble que en la zona B.

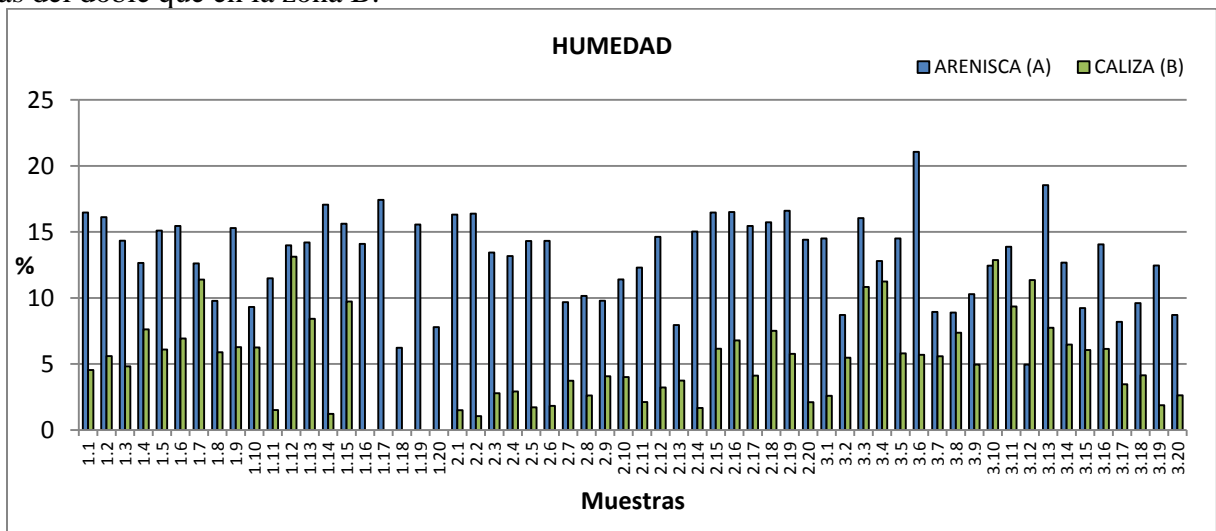


Figura 18: Gráfico mostrando la comparativa entre el porcentaje de humedad presente en las muestras tomadas por un lado sobre arenisca y por el otro sobre caliza.

### 4.2.2. Water Drop Penetration Time test:

Se observa un alto grado de hidrofobicidad en todas las plantaciones de *E. globulus* analizadas con una excepción, la plantación A2. Esta plantación, sobre sustrato de arenisca, muestra valores hidrofílicos o de bajo grado de hidrofobicidad en toda la línea de muestras.

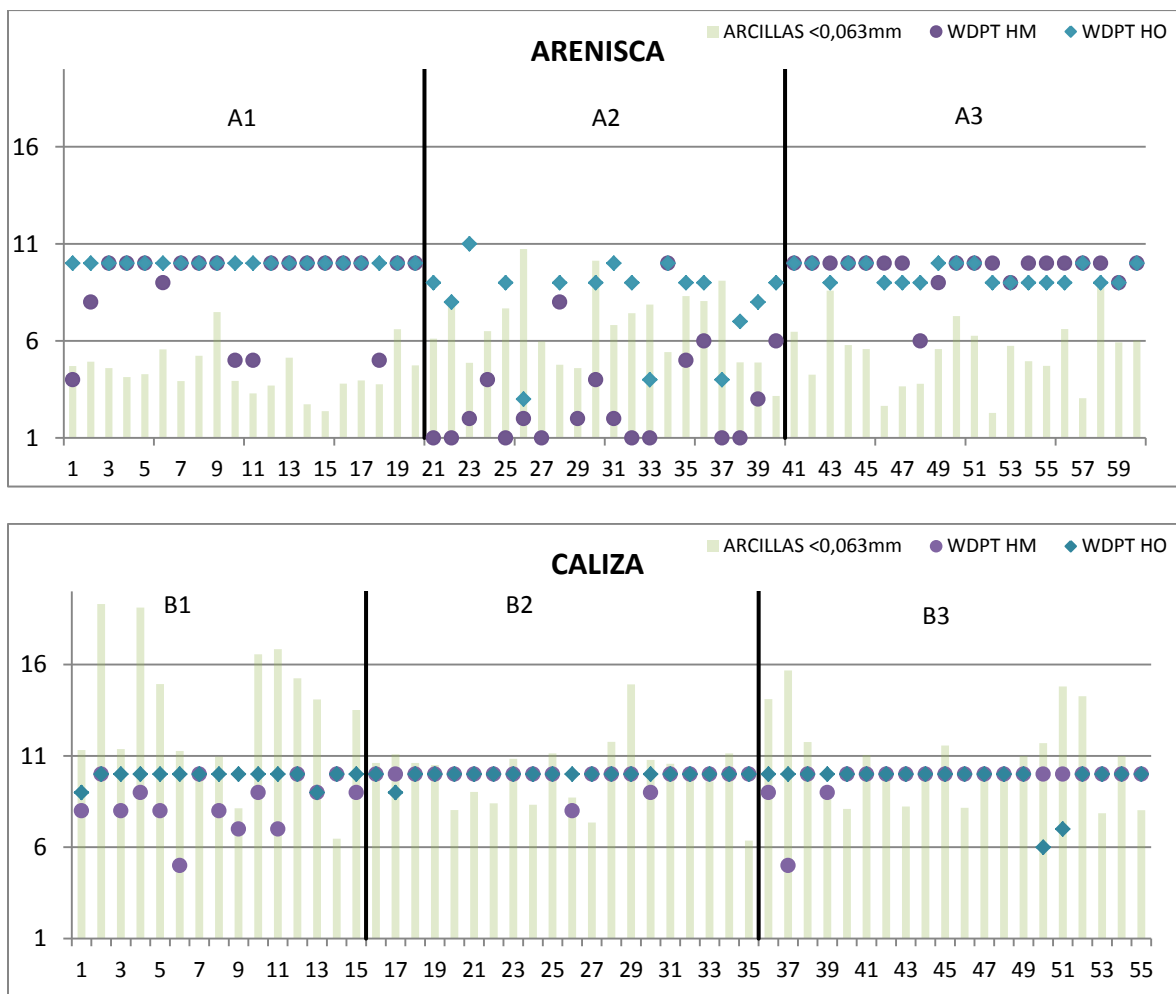


Figura 19: Gráficos mostrando el grado de hidrofobicidad medido con el método WDPT en ambos horizontes: horizonte mineral (HM) y horizonte orgánico (HO). El grafico de la parte superior corresponde a las muestras analizadas en las tres plantaciones sobre sustrato formado por arenisca (zona A). El grafico en la parte inferior corresponde a las muestras analizadas en las tres plantaciones sobre sustrato formado por caliza (zona B). En ambos gráficos se ha incluido el porcentaje de arcillas presentes en cada muestra para analizar su efecto en el grado de hidrofobicidad presente.

Entre las plantaciones sobre sustrato calizo es la línea de puntos B1 la que muestra un grado de hidrofobicidad más bajo que en B2 y B3 (Figura 19).

Dado que hay autores previamente comentados (Cann y Lewis, 1994) que sugieren que una adición de arcillas en un suelo hidrofóbico podría revertir esta hidrofobicidad, en la Figura 19 se ha incluido el porcentaje de arcillas presente en cada una de las muestras para observar en qué medida afecta el aumento de esta fracción (<0.063mm) en el grado de hidrofobicidad de cada muestra. En este caso coincide que observando por un lado las muestras sobre arenisca:

la línea A2 (6,77%) tiene mayor porcentaje medio de arcilla que las líneas A1 (4,45%) y A3 (5,47%). Y por otro lado la línea sobre caliza: la línea B1 (13,28%) tiene el mayor contenido medio en arcillas seguido de B3 (10,76%) y B2 (9,85%). Coincidiendo con la hipótesis de que cuanto más fracción fina hay en un suelo menos hidrofóbico es este (Crockford *et al.* 1991). Sin embargo, las muestras de las líneas B1, B2 y B3 tienen aproximadamente el doble de porcentaje de arcillas que las muestras de las líneas A1, A2 y A3 y son más o igual de hidrofóbicas. Por lo tanto, el contenido en arcillas no parece ser determinante en el grado de repelencia al agua que muestra el suelo en este caso.

Comparando el grado de hidrofobicidad presente en el horizonte mineral con el obtenido en el horizonte orgánico se observa una tendencia a mostrar mayor hidrofobicidad en el horizonte orgánico que en el horizonte mineral. En el horizonte orgánico el 92% de las muestras tienen un grado de hidrofobicidad muy alto de 9 o 10. Mientras que en el horizonte mineral es del 70% (Fig. 20).

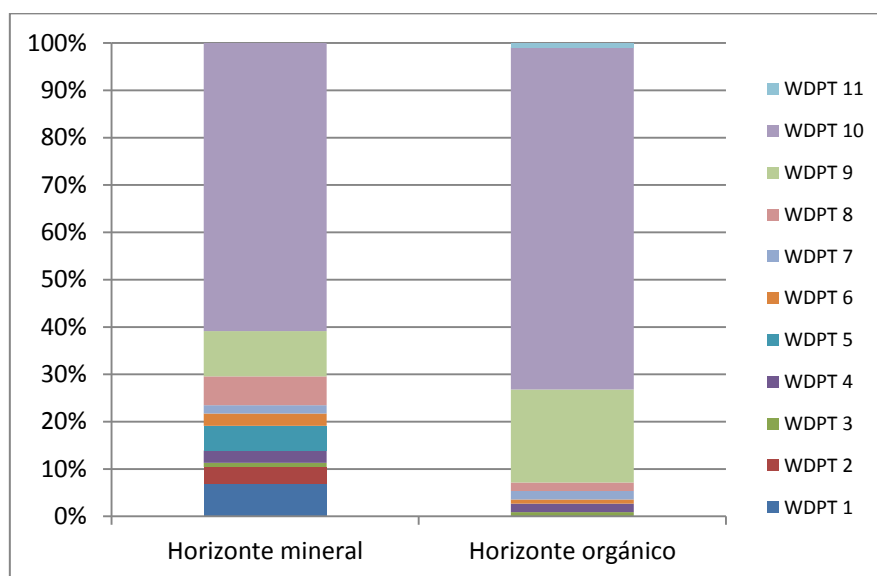


Figura 20: Gráfico comparativo del grado de hidrofobicidad en el horizonte orgánico respecto al grado de hidrofobicidad presente en el horizonte mineral en porcentajes totales obtenidos en el conjunto de muestras analizadas para este trabajo.

Además en el horizonte orgánico (HO) no hay ninguna muestra hidrofílica (WDPT=1) mientras que en el horizonte mineral (HM) el 7% de las muestras son hidrofílicas.

#### 4.2.3. Análisis granulométrico:

En lo referente a la granulometría las líneas B1, B2 y B3 parecen mostrar la misma tendencia. Mientras que en las líneas sobre arenisca (A), la A3 muestra mayor porcentaje de las fracciones más gruesas (gravas y arenas gruesas) respecto a las líneas A1 y A2 como se observa en el gráfico (Fig. 21).



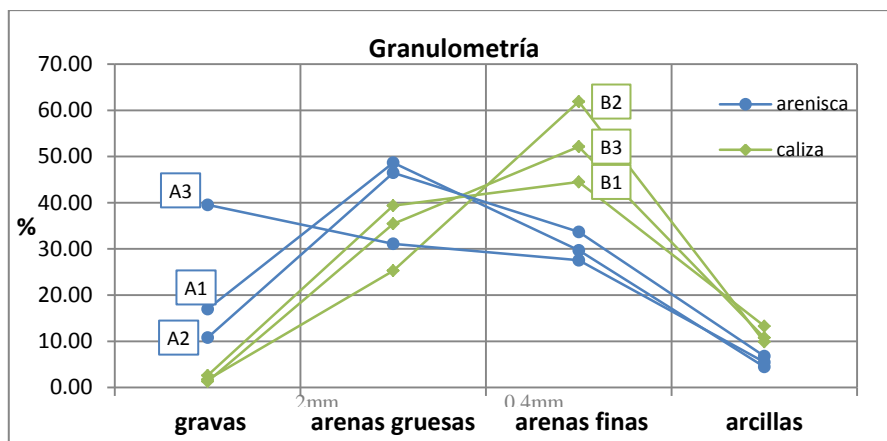


Figura 21: Curvas granulométricas obtenidas mediante el tamizado de los suelos de cada una de las plantaciones: A1, A2 y A3 sobre arenisca y B1, B2 y B3 sobre caliza.

La línea de muestras A3 contiene un alto porcentaje de gravas siendo más del doble que el siguiente que es la línea de muestras A1. Sin embargo, las muestras obtenidas sobre sustrato calizo contienen muy pocas gravas (media de todas las muestras 1.9 %) en comparación con las de la línea B (media de todas las muestras 21.9 %).

En las muestras tomadas sobre sustrato calizo existe a simple vista (Fig. 21) una relación inversa entre las diferentes fracciones de arena. Cuanto más arena gruesa menos arena fina contiene la muestra y viceversa. Las muestras en arenisca muestran menos cantidad de arena fina que las muestras B (caliza) y exceptuando la línea de muestras A3 muestran más arena gruesa que las de las líneas B, manteniendo en general, la relación inversa ya comentada.

Respecto a la fracción más fina (limos y arcillas) se evidencia que las muestras sobre caliza contienen más finos que las muestras sobre arenisca. Todas las muestras tomadas sobre arenisca tienen valores inferiores al 11% del total de la muestra; en la línea A1 incluso solo hay 2 muestras de veinte que superan el 6 % de contenido en finos. En las muestras sobre sustrato calizo sin embargo la fracción fina llega hasta valores máximos de 19.32 % aunque la media es de 11.3% en los suelos B (caliza) y de un 5.6% en los suelos A. Por tanto, los suelos sobre calizas tienen el doble de limos y arcillas que las muestras sobre areniscas.

#### 4.2.4. Carbono Orgánico Total (TOC):

Con el fin de analizar la influencia del contenido de carbono orgánico total o TOC (Total Organic Carbon) en el grado de hidrofobicidad presente en los suelos analizados en este trabajo se seleccionaron seis muestras.

El criterio de selección principal se basó en el grado de hidrofobicidad que presentaban las muestras en el análisis de WDPT. Se seleccionaron tres muestras hidrofílicas y de baja hidrofobicidad de la línea de muestras A2 y otras tres muestras con un grado extremo de hidrofobicidad pertenecientes a la línea B2.

En este punto se tomó en consideración únicamente el horizonte mineral ya que el horizonte orgánico está formado prácticamente en su totalidad de carbono orgánico.

Las muestras elegidas finalmente fueron las que figuran en la Tabla V.

Muestra	Hidrofobicidad HM	Muestra	Hidrofobicidad HM
A2.1	1	B2.4	10
A2.9	2	B2.10	10
A2.19	3	B2.12	10

Tabla V: Muestras significativas seleccionadas por su grado de hidrofobicidad para análisis de TOC

Como ya se ha comentado en el apartado referido a metodología, se hizo una réplica de cada muestra para asegurar la validez de los resultados obtenidos.

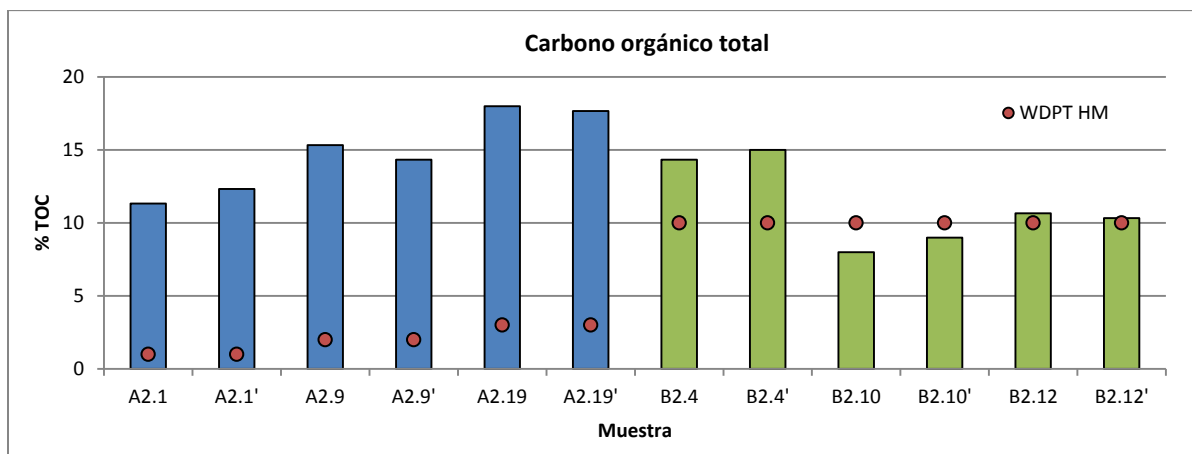


Figura 22: Gráfico que muestra los resultados obtenidos mediante la mufla. A los datos correspondientes al porcentaje de carbono orgánico total se superponen los valores del grado de hidrofobicidad del horizonte mineral.

Los resultados obtenidos con la mufla muestran un mayor contenido en TOC en las muestras pertenecientes a la plantación A2 como se observa en la figura 22. Además llama la atención que a medida que aumenta el grado de hidrofobicidad también lo hace el contenido en TOC. En la línea de muestras B2 sin embargo el grado de hidrofobicidad es extremo e igual para todas las muestras y sin embargo el porcentaje de carbono orgánico total pasa del 15% al 8% sin aparentemente guardar relación alguna con el grado de hidrofobicidad.

Esto se debe a que el total de materia orgánica no se relaciona directamente con la repelencia de agua que muestra un suelo sino que es el tipo de materia orgánica el que guarda relación con el grado de hidrofobicidad (Wallis y Horne, 1992, Cuevas, 2006).

#### 4.2.5. pH y CE:

El pH y la conductividad eléctrica se midieron en las mismas muestras seleccionadas para el análisis del TOC. Además, estas propiedades también se analizaron en dos muestras más de cada una de las líneas: A1, A3, B1 y B3.

Los resultados muestran que los suelos en las zonas analizadas son en general ácidos o muy ácidos. Curiosamente los suelos más ácidos son los que se encuentran sobre sustrato calizo, este hecho es sorprendente ya que el calcio (Ca) aumenta el pH del suelo y era de esperar que la arenisca mostrase los valores más ácidos.

Todas las muestras en las que se ha analizado correspondientes a la zona B (sustrato calizo) muestran un valor más o menos constante de un pH=4. En las plantaciones B1 y B2 el valor medio del pH es de 4 que es el más bajo de todas las parcelas y en la plantación B3 es ligeramente más alto (pH=4.1).

Sin embargo, en las muestras analizadas sobre sustrato de arenisca (zona A) se observa un pH bastante variable y en rasgos generales más alto que en las muestras B (Fig. 23).

Los valores más altos de pH se observan en la plantación denominada A2 que muestra un pH medio de 5.5. En las plantaciones A1 y A3 el valor medio del pH coincide y es de pH=4.4.

Por tanto, los valores de pH obtenidos en las seis plantaciones de *E. globulus* son bajos. Esto podría estar relacionado con parámetros climáticos locales como la precipitación. Los valores de pH de los suelos son en general ligeramente ácidos (aunque estén sobre sustrato calizo) debido al lavado de cationes ocasionado por las precipitaciones.

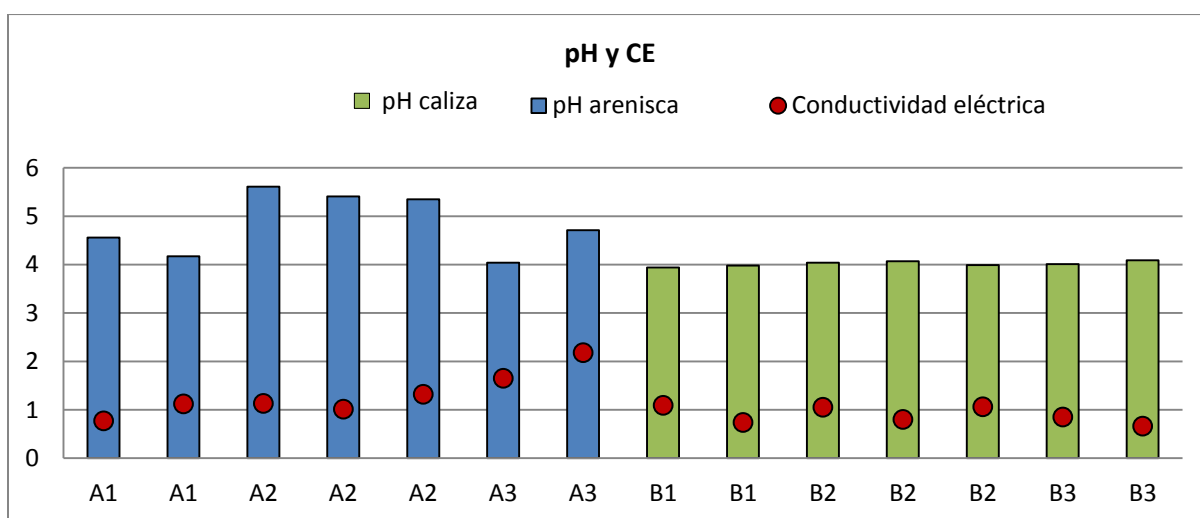


Figura 23: Gráfico que muestra los resultados de pH y conductividad eléctrica de las muestras analizadas.

Además de las precipitaciones, la materia orgánica es otro factor que tiende a acidificar los suelos.

Existe unanimidad entre varios autores que el ingreso de compuestos ácidos desde el mantillo provocaría, junto a la lixiviación de cationes, un descenso del pH (Ugolini *et al.*, 1988). Sin embargo, últimamente autores como Jobbágy y Jackson (2003) determinan que el proceso de acidificación se relaciona directamente con el reciclado y redistribución del calcio por los propios árboles, que hacen bajar el pH.

Hay trabajos (Diehl *et al.*, 2010) que relación directamente el pH que muestra un suelo con el grado de hidrofobicidad concluyendo que la hidrofobicidad de un suelo disminuye según aumenta el pH. Esto se debe a que el aumento del pH causa un aumento de la densidad de cargas negativas debido a la “desprotonación” que se da en la superficie de los agregados que forman el suelo aumentando con ello la repelencia a las moléculas de agua.

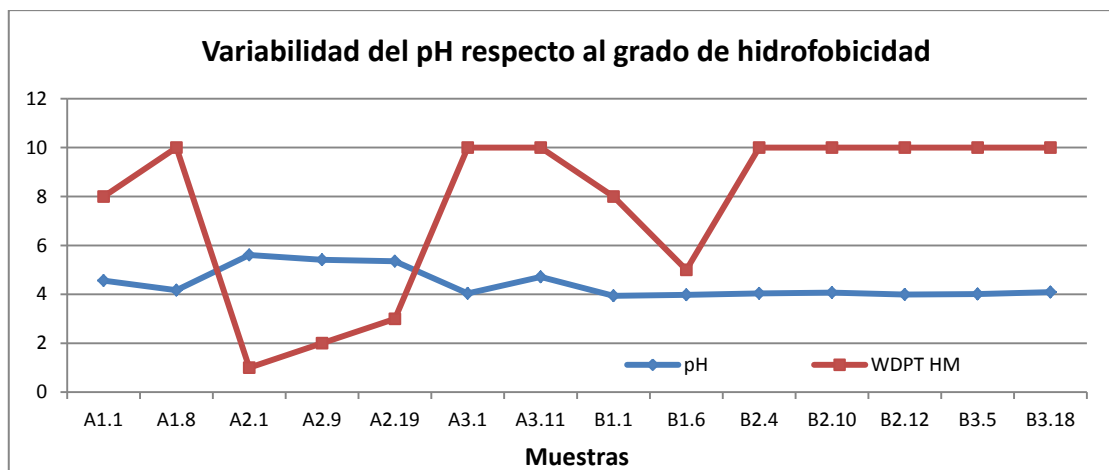


Figura 24: Grafico que muestra la relación entre el grado de hidrofobicidad en el horizonte mineral y el pH.

Comparando los resultados del test WDPT y del pH (Fig. 24) se observa que las muestras correspondientes al bosque A2 (A2.1, A2.9, A2.19) muestran valores más elevados de pH que corresponden con los valores menos hidrofóbicos, mientras que en el resto de bosques el pH se mantiene en valores más bajos y la hidrofobicidad es extrema. Por otro lado, la muestra B1.6 no sigue esta tendencia ya que muestra una hidrofobicidad media y el pH es de 3.98 (no sube). Esto nos puede llevar a pensar que la hidrofobicidad desciende a medida que aumenta el pH tal como sostiene el trabajo de Diehl et al. (2010).

La conductividad eléctrica (CE) se ha medido en las mismas muestras utilizadas para medir el pH. Si definimos un suelo salino como aquel que tiene una CE de entre 0.66 -1.15 dS/m, los valores muestran el carácter salino de las muestras. Los valores de CE por encima de 1.15 dS/m muestran un carácter muy salino. El valor máximo obtenido es de 2.18 dS/m (A3) y el mínimo de 0.66 dS/m (B3). La CE es más elevada en términos generales en los suelos sobre arenisca que en los suelos sobre caliza: A=1.3 dS/m y B= 0.89 dS/m de media.

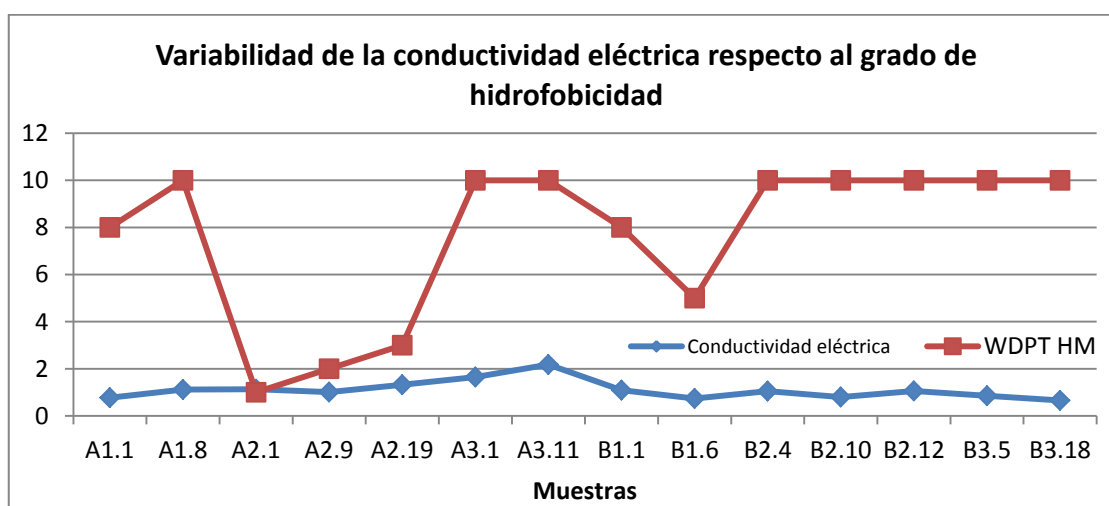


Figura 25: Gráfico que muestra la relación entre el grado de hidrofobicidad en el horizonte mineral y la conductividad eléctrica.

A diferencia del pH, la conductividad eléctrica no parece guardar ninguna relación con la hidrofobicidad de las muestras (Fig. 25).

Todas las muestras analizadas son salinas salvo las muestras A2.19, A3.1 y A3.11 que son muy salinas. La ubicación de las muestras en primera línea de costa parece ser la causa de la salinidad de las muestras.

#### 4.2.6. Correlaciones:

Se han estudiado las correlaciones entre la hidrofobicidad (WDPT) del horizonte orgánico y mineral y las fracciones texturales de todas las muestras juntas (Tabla VI), de las muestras sobre areniscas (Tabla VII) y de las muestras sobre calizas (Tabla VIII). Los resultados se muestran a continuación.

El grado de hidrofobicidad entre el horizonte orgánico y el horizonte mineral muestra correlaciones significativas cuando analizamos todas las muestras en conjunto (Tabla VI) y en las muestras de arenisca (Tabla VII). A medida que el grado de hidrofobicidad sube en el horizonte mineral también lo hace en el orgánico.

Variable (Total)	Litología	Gravas (>2mm)	Arenas gruesas (2mm-0,4mm)	Arenas finas (0,4mm-0,063mm)	Arcillas y limos (<0,063mm)	WDPT horizonte mineral	WDPT horizonte orgánico
Litología	1,00	0,62**	0,39**	-0,81**	-0,75**	-0,38**	-0,27**
Gravas (>2mm)	0,62**	1,00	-0,22**	-0,75**	-0,60**	0,08	0,02
Arenas gruesas (2mm-0,4mm)	0,39**	-0,22**	1,00	-0,41**	-0,23**	-0,51**	-0,25**
Arenas finas (0,4mm-0,063mm)	-0,81**	-0,75**	-0,41**	1,00	0,63**	0,28**	0,16
Arcillas y limos (<0,063mm)	-0,75**	-0,60**	-0,23**	0,63**	1,00	0,12	0,08
WDPT horizonte mineral	-0,38**	0,08	-0,51**	0,28**	0,12	1,00	0,55**
WDPT horizonte orgánico	-0,27**	0,02	-0,25**	0,16	0,08	0,55**	1,00

Tabla VI: Tabla que muestra los datos obtenidos en el análisis de correlación de todas las muestras independientemente del origen litológico de los suelos. (\*\* = sig 0.01)

Variable (Arenisca)	Gravas (>2mm)	Arenas gruesas (2mm-0,4mm)	Arenas finas (0,4mm-0,063mm)	Arcillas y limos (<0,063mm)	WDPT horizonte mineral	WDPT horizonte orgánico
Gravas (>2mm)	1,00	-0,74**	-0,78**	-0,51**	0,46**	0,26**
Arenas gruesas (2mm-0,4mm)	-0,74**	1,00	0,21	0,12	-0,44**	-0,21
Arenas finas (0,4mm-0,063mm)	-0,78**	0,21	1,00	0,68**	-0,24	-0,18
Arcillas y limos (<0,063mm)	-0,51**	0,12	0,68**	1,00	-0,38**	-0,31**
WDPT horizonte mineral	0,46**	-0,44**	-0,24	-0,38**	1,00	0,56**
WDPT horizonte orgánico	0,26**	-0,21	-0,18	-0,31**	0,56**	1,00

Tabla VII: Tabla que muestra los datos obtenidos en el análisis estadístico de correlación solo en las plantaciones con sustrato de arenisca (plantaciones A1, A2 y A3). (\*\* = sig 0.01)

Las correlaciones correspondientes a las plantaciones sobre sustrato de arenisca (A1, A2 y A3) muestran una correlación positiva entre el grado de hidrofobicidad y el contenido en gravas (>2mm) de los suelos.

El grado de hidrofobicidad de ambos horizontes está positivamente correlacionado. Esta correlación es fuerte y determina que el grado de hidrofobicidad aumenta al mismo tiempo tanto en el horizonte orgánico como en el mineral.

A medida que la fracción menor de 0.063mm en la muestra, esto es, menor porcentaje de arcillas y limos sube el grado de hidrofobicidad en ambos horizontes. Las arenas gruesas están también correlacionadas negativamente con la hidrofobicidad en el horizonte mineral.

Variable (Caliza)	Gravas (>2mm)	Arenas gruesas (2mm- 0,4mm)	Arenas finas (0,4mm- 0,063mm)	Arcillas y limos (<0,063mm)	WDPT horizonte mineral	WDPT horizonte orgánico
Gravas (>2mm)	1,00	-0,10	-0,24	0,08	0,07	0,01
Arenas gruesas (2mm- 0,4mm)	-0,10	1,00	-0,80**	0,07	-0,42**	0,02
Arenas finas (0,4mm- 0,063mm)	-0,24	-0,80**	1,00	-0,32**	0,43**	0,01
Arcillas y limos (<0,063mm)	0,08	0,07	-0,32**	1,00	-0,28**	-0,14
WDPT horizonte mineral	0,07	-0,42**	0,43**	-0,28**	1,00	-0,07
WDPT horizonte orgánico	0,01	0,02	0,01	-0,14	-0,07	1,00

*Tabla VIII: Tabla que muestra los datos obtenidos en el análisis estadístico de correlación solo en las plantaciones con sustrato de caliza (plantaciones B1, B2 y B3). (\*\* =sig 0.01)*

Sobre sustrato calizo (B1, B2 y B3) no existe correlación alguna entre el grado de hidrofobicidad entre el horizonte mineral y horizonte orgánico. Es más, el grado de hidrofobicidad en el horizonte orgánico no muestra correlación con ninguna de las variables analizadas (Tabla VIII).

Por otro lado la fracción de arenas gruesas se correlaciona negativamente con la fracción de arenas finas, a medida que aumenta el contenido en arena gruesa disminuye el contenido en arena fina. El grado de correlación entre estas dos fracciones es muy fuerte.

La fracción de arenas finas a su vez muestra una correlación negativa con el contenido de arcillas y positiva con el grado de hidrofobicidad del horizonte mineral. El aumento del contenido de arenas finas sube a la vez que el grado de hidrofobicidad en el horizonte mineral.

Por último, la fracción fina (arcillas y limos) se correlaciona negativamente con el grado de hidrofobicidad en el horizonte mineral.

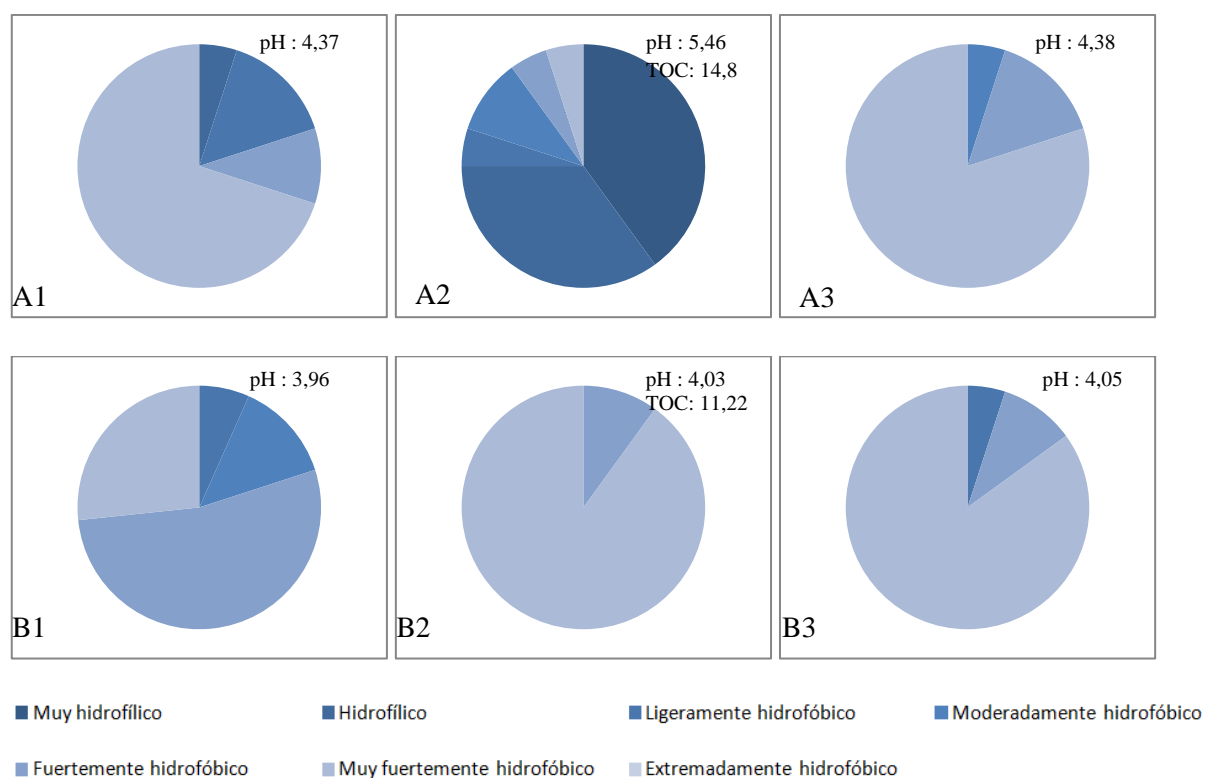
## 5. Conclusiones.

La litología del sustrato no parece ser un factor determinante en el grado de hidrofobicidad a priori, sin embargo en los análisis de correlaciones se han establecido relaciones con las fracciones minerales que corresponden a cada suelo:

Así, en las muestras sobre arenisca (A) la hidrofobicidad en el horizonte mineral aumenta con el porcentaje de gravas y disminuye cuando aumentan los porcentajes de limo y arcillas.

Por otra parte, en las muestras sobre caliza (B) el grado de hidrofobicidad en el horizonte mineral aumenta con el porcentaje de arenas finas pero disminuye también cuando aumentan los porcentajes de arcillas y limos.

En todas las plantaciones (excepto en la A2) los suelos son muy fuertemente o fuertemente hidrofóbicos (clasificación en Tabla IV). Esto no ocurre en la línea de muestras A2 que muestra un 40% de muestras muy hidrofílicas y un 35% hidrofílicas destacando entre los demás suelos estudiados (Fig. 26).



*Figuras 26: Gráficos mostrando el porcentaje de cada grado de hidrofobicidad del WDPT (de 1 a 7) en cada una de las plantaciones de E. globulus analizadas. También se indica el pH y contenido total de carbono.*

El hecho de que el pH muestre valores en el entorno de 4 en todos los suelos independientemente del sustrato analizado podría explicarse por la propia actividad de los *E. globulus* que extraen Ca del suelo acidificándolo. A la plantación más joven sin embargo no le habría dado tiempo de captar tanto Ca como para acidificar el terreno debido a su corta edad.

La plantación forestal de *E. globulus* más joven (A2) con un horizonte orgánico menos evolucionado que el resto es la única que representa suelos hidrofílicos o con un grado bajo de hidrofobicidad. El resto de plantaciones, con individuos de más edad, muestran suelos muy fuertemente o fuertemente hidrofóbicos. Por tanto, la edad de la plantación de *E. globulus* en este caso es un factor determinante en la hidrofobicidad de los suelos.

El contenido de carbono orgánico total (TOC) es 3.58 % más elevado que en la plantación A2 que en la B2. Este resultado sugiere que, como ya se ha comentado anteriormente, el contenido en carbono orgánico total no se relaciona con la hidrofobicidad aunque si se ha demostrado en otros estudios que la composición de materia orgánica si podría estar relacionada con la hidrofobicidad.

Por último concluir que el factor más determinante en la aparición de hidrofobicidad y acidificación en los suelos parece ser el propio uso del terreno, osea, la actividad forestal asociada al uso extensivo de *Eucalyptus globulus*.



## 6. Bibliografía.

---

Adam, N.K., 1963. Principles of water-repellency. In: Moillet, Ž. J.L. Ed. , Water Proofing and Water-Repellency. Elsevier, London, pp. 1–23.

Aelamanesha, P., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Ahrensa, B. y Safari Sinemani, A.A., 2014. Water Repellency in Calcareous Soils Under Different Land Uses in Western Iran *Pedosphere* 24(3): 378–390

Anderson, W.G., 1986. Wettability literature survey: Part 3. The effects of wettability on the electrical properties of porous media. *Journal of Petroleum Technology*, 1371–1378, Dec.

Bastida, F. y Aller, J. 1995. Rasgos geológicos generales. En: *Geología de Asturias*. (Aramburu, C. y Bastida, F., eds). Ediciones Trea, S.L. Gijón: pp 27-33.

Brañas, J., Gonzalez-Rio, F., Merino, A. 2000. Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus globulus* del noreste de la península. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* Vol. 9 (2).

Cann, M., Lewis, D., 1994. The use of dispersible sodic clay to overcome water repellence in sandy soils in the South East of South Australia. *Proceedings of the 2nd National Water Repellency Workshop*, 1–5 August, Perth, Western Australia. pp. 49–57.

Cortez, N. y Madeira, M. 1998. The effect of *Eucalyptus globulus* plantations on soil nutrient status. *Proc. Of XVI World Congress of soil Science*. Montpellier, France. CD-Rom, Symposium N° 33, Scientific registration N° 1885.

Crockford, S., Topalidis, S., Richardson, D.P., 1991. Water repellency in a dry sclerophyll forest — measurements and processes. *Hydrological Processes* 5, 405–420.

Cuevas, J., 2006. Efecto de la materia organica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *J. Soil Sc. Plant. Nutr.* 6 (2), 13- 27.

DeBano, L.F., 1991. The effects of fire on soil properties. United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report, INT-280, 151–156.

Dekker, L.W., Ritsema, C.J., 1996a. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena* 28, 89–105.

Diehl, D., Bayer, J.V., Woche, S.K., Bryant, R., Doerr, S.H., Schaumann, G.E., 2010. Reaction of soil wáter repellency to artificially induced changes in soil pH. *Geoderma* 158, 375-384.

Dinel, H., Schnitzer, M., Mehuys, G.R., 1990. Soil lipids: origin, nature, content, decomposition, and effect on soil physical Ž. properties. In: Bollag, J.M., Stotzky, G. Eds. , *Soil Biochemistry*, vol. 6. Marcel Dekker, New York, pp. 397–429.

Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 1996. Soil water repellency variations with depth and particle size fraction in burned and unburned *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* forest terrain in the Agueda basin, Portugal. *Catena* 27 (1), 25-47.

Doerr, S.H., 1998. Short communication on standardizing the “Water Drop Penetration Time” and the “Molarity of an Ethanol Droplet” techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using médium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 663-668.

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

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

Doerr, S.H., Shakesby, R.A., MacDonald, L.H., 2011. Chapter I.7: Soil Water Repellency: A key factor in post-fire erosion? Accepted for publication in: Cerda, A. & Robichaud P. (Eds) . Consultado en <http://geography.swan.ac.uk/>

Doerr, S.H., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., Shakesby, R.A., Bryant, R., 2002. Water repellency of soils: the influence of ambient relative humidity. *Soil Science Society of America Journal* 66, 401-405.

Doerr, S.H., Llewellyn, C.T., Douglas, P., Morley, C.P., Mainwaring, K.A., Haskins, C., Johnsey, L., Ritsena, C.J., Stagnitti, F., Allison, G., Ferreira, A.J.D., Keizer, J.J., Ziogas, A.K. y Diamantis, J., 2005. straction of compounds associated with water repellency in Sandy soils with different origin. *Australian Journal of soil Research* 43, 225-237.

Domingo-Santos, J.M., 2010. El eucalipto y los suelos bajo clima mediterraneo. *Boletín del CIDEU* 8-9:15-30 ISSN 1885-5237.

Gallastegui, J. 2000. Estructura cortical de la cordillera y margen continental Cantábricos: perfiles ESCI-N. Universidad de Oviedo. *Trabajos de Geología: numero 22*.

Granged, A.J.P., Jordán, A., Zavala, L.M., Muñoz-Rojas, M. y Mataix-Solera, J., 2011. Short-term effects of experimental fire for a soil under eucaliptus forest (SE Australia). *Geoderma* 167-168, 125-134.

Hallin I., Douglas, P., Doerr, S.H., Bryant, R., 2013. The Role of Drop Volume and Number on Soil Water Repellency Determination. *Soil Science Society of America Journal*. 77:1732–1743.

Huffman , E.I., MacDonald, L.H., Stednick, J.D., 2001. Strength and persistence of fire – induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range. *Hydrol. Proc.* 15,2877-2892.

Jaramillo, D.F., 2004. Repelencia al agua en suelos.Con énfasis en Andisoles de Antioquia. Universidad nacionañ de Colombia, Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias. Medellín. Consultado en: <http://www.unalmed.edu.co/>

Jaramillo, D.F., 2006. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 30 (115) 215-232. ISSN 0370-3908.

Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2003. Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversión of grasslands to forests. *Biogeochemistry*, 64: 204-229.

Julivert, M. (1971): Dècollement tectonics in the hercynian Cordillera of NW Spain. *Amer. Jour. Sci.*, 270: 1-29.

Julivert, M. Marcos, A. y Truyols, J (1972): L´evolution paleogeographique du NW. De l´Espagne pendant l´Ordovicien – Silurien. *Bull. Soc. Geol. Min. Bret.*, 4, 1, pp. 1-7.

Lago Mendez, J.M., 2007. Artículo de la Coordinadora Ecoloxista d`Asturies. *Indurot*.

Leighton-Boyce, G., Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., Ferreira, A.J., Boulet, A-K., Coelho, C., 2005. Temporal dynamics of water repellency and soil moisture in eucalypt plantations, Portugal. Accepted for publication in *Australian Journal of Soil Research*.

Leighton-Boyce, G., Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D. 2002. Spatio-temporal patterns of soil wáter repellency in eucalypt forestes at diferent scales of study. Paper number: 1788. Symposium n° 02.

Lotze, F. (1945): Zur gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotekt Forsch.*, 6, pp. 1-12. (Trad. Por J. M. Ríos, 1950. Observaciones respecto a la división de los variscides de la Meseta Ibérica. *Publ. Extr. Geol. España*, V, pp. 149-166).

McGhie, D.A., Posner, A.M., 1980. Water repellence of a heavytextured western Australia surface soil. *Australian Journal of Soil Research* 18, 309–323.

Müller, K., Deurer, M., 2011. Review of the remediation strategies for soil water repellency. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 144, 208-221.

Neris, J., Jiménez, C., Fuentes, J., Morillas, G. y Tejedor, M., 2012. Vegetation and land-use effects on soil properties and wáter infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena* 98, 55-62

Parker, S.D., 1987. *Encyclopedia of Science and Technology*. McGraw-Hill, New York.

Reeder, C.J., Juergensen, M.F., 1979. Fire-induced water repellency in forest soils of upper Michigan. *Canadian Journal of Forest Research* 9, 369–373.

Dekker, L.W., Ritsema, C.J., 1996a. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena* 28, 89–105.

Roberts, F.J., Carbon, B.A., 1971. Water repellence in sandy soils of south-western Australia: 1. Some studies related to field . occurrence. Division of Plant Industry CSIRO Australia . *Field Station Record* 10, 13–20.

Roper, M., 1998. Sorting out sandy soils. *Microbiology Australia* 19 (1) , 6-7.

Shakesby, R.A., Doerr, S.H., Walsh, R.P.D., 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *Journal of Hydrology* 231-232, 178-191.

Scott, D.F., 1992. The influence of vegetation type on soil wettability. *Proceedings of the 17th Congress of the Soil Science Society of South Africa, University of Stellenbosch*, 28–30th Jan. 1992. pp. 10B21–10B26

Rwuanza, S., Gaertner, M., Esler, K.J., Richardson, D.M., Esler, K.J., 2013. Soil water repellency in riparian systems invaded by *Eucalyptus camaldulensis*: A restoration perspective from Western Cape Province, South Africa. *Geoderma* 200-201, 9-17.

Tschapek, M., 1984. Criteria for determining the hydrophilicity– hydrophobicity of soils.

Ugolini, F.C., Dahlgren, R.A., Shoji, S., Ito, T., 1988. An example of andolization and podzolization as revealed by soil solution studies, southern Hakkoda, northeastern Japan. *Soil Science* 145: 111-125.

Wallis, M.G., Horne, D.J., 1992. Soil water repellency. In: *Stew. art, B.A. Ed. , Advances in Soil Science Vol. 20* Springer, New York, pp. 91–146.

Wilkinson, J.F., Miller, R.H., 1978. Investigation and treatment of localized dry spots on sand golf greens. *Agronomy Journal* 66, 299–304

Zavala, L.M., Garcia-Moreno, J., Gordillo-Rivero, A.J., Jordan, A. y Mataix-Solera, J., 2014. Natural soil repellency in different types of Mediterranean woodlands. *Geoderma* 226-227, 170-178

*Zeitschrift fur Pflanzenernaehrung und Bodenkunde* 147, 137–149.

En la web:

Google Earth

Magna 50 (páginas 13 y 14)