



*ugr*

Universidad  
de **Granada**

# Estudio de algunas propiedades físicas en muestras de suelo con posos de café adicionados en un ensayo de laboratorio

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Estefanía Molina Santiago

Granada, diciembre de 2015.

# Estudio de algunas propiedades físicas en muestras de suelo con posos de café adicionados en un ensayo de laboratorio

**Autor: Estefanía Molina Santiago**

**Tutor: Manuel Sánchez Marañón**

## **Agradecimientos**

A los profesores Dr. Juan Manuel Martín García, Dr. Rafael Delgado Calvo-Flores y Dr. Jesús Párraga Martínez del Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada por sus ánimos y apoyo durante todo el trabajo, y por sus elocuentes conversaciones de las que he aprendido mucho. Y en especial al profesor Juan Manuel Martín García por ser quién me sugirió y animó a realizar este trabajo y por ser el primero en hacerme ver lo maravilloso del mundo de la edafología.

Gracias a Ana Gloria Cervera Mata , graduada en Ciencia y Tecnología de los Alimentos, por su gran ayuda en el laboratorio, así como por aportarme las características químicas de las muestras de suelo utilizadas en este Trabajo Fin de Grado en Ciencias Ambientales. Los datos químicos se usaron para interpretar algunos de los resultados obtenidos en los análisis de propiedades físicas que yo he realizado.

A D. Ángel Veras Yudes, técnico de laboratorio del Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada por su inestimable ayuda en los análisis del laboratorio.

Al profesor Dr. Gabriel Delgado Calvo-Flores por su gran dedicación incondicional y compromiso en ayudarme siempre en todo lo necesario. Por haber estado todos los días atendiéndome y enseñándome cosas nuevas sobre la edafología. Sin él no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

A Manuel Sánchez Marañón del Departamento de Edafología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada, tutor del presente Trabajo Fin de Grado, por su gran ayuda en todo lo que me ha sido necesario así como por compartir conmigo sus conocimientos y hacerme aprender.

En general. gracias a todo el Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada por hacerme sentir uno más de esa pequeña familia, por su trato tan amable y divertido que han hecho mucho más amenos los días en el laboratorio y que se han preocupado porque siempre estuviese cómoda.

Y por supuesto, gracias a mi familia por apoyarme y darme ánimos durante toda esta etapa.

La parte experimental de este trabajo ha sido realizado en los laboratorios del Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Farmacia de Granada. Este estudio forma parte de los primeros ensayos del proyecto de investigación "Estrategias Competitivas para la Industria Agroalimentario. Revalorización de Subproductos Cafeteros. Mediante el Diseño de Alimentos Funcionales y Biofortificación Agronómica" (AGL2014-53895-R), concedido para su ejecución durante el periodo 2015-2018.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1 Los residuos.....	4
1.1.1 Problemática ambiental de los residuos	4
1.1.2 Clasificación de los residuos	4
1.1.3 Gestión, tratamiento y valorización de los residuos de la Industria Agroalimentaria	5
1.2 Residuos del café y sus posibilidades de revalorización.....	6
1.2.1 El café y sus residuos	6
1.2.2 Alternativas ambientales para los residuos o posos del café	7
1.3 Estructura del suelo y sus propiedades derivadas.....	8
1.3.1 Estructura del suelo	8
1.3.2 Estabilidad estructural	9
1.3.3 Densidad a aparente	9
1.3.4 Retención de agua y agua útil	10
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS</b>	<b>12</b>
3.1 Ensayo.....	12
3.1.1 Suelos	12
3.1.2 Café	13
3.1.3 Planta	13
3.1.4 Tiempo	13
3.2 Materiales y métodos analíticos.....	13
3.2.1 Muestras	13
3.2.2 Fraccionamiento de los agregados	14
3.2.3 Medición de la estabilidad estructural	15
3.2.4 Retención de agua	16
3.2.5 Densidad Aparente (Da)	16
3.2.6 Agua útil (Au)	17
3.3 Materiales y métodos para el análisis estadístico.....	17
3.4 Materiales y métodos morfológicos.....	18
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>19</b>
4.1 Propiedades físicas de las muestras de suelo.....	19
4.1.1 Fraccionamiento de los agregados por tamaño	19
4.1.2 Porcentaje de agregados estables	22
4.1.3 Retención de agua	25
4.1.4 Agua útil	27
4.1.5 Densidad aparente	29
4.2 Análisis estadístico de las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo.....	30
4.2.1 Estadística descriptiva	30
4.2.2 Análisis de varianza (ANOVA)	32
4.2.3 Análisis de correlación	34
4.2.4 Análisis factorial	36
4.3 Resultados de estudio morfológico con estereomicroscopio y SEM.....	39
<b>5. CONCLUSSIONES</b>	<b>45</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>46</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Los Residuos

Entendemos los residuos como cualquier desecho orgánico o inorgánico que generan los seres vivos en general. Los residuos forman parte del planeta Tierra desde que existe la vida.

### 1.1.1 Problemática ambiental de los residuos

Ahora bien, en un principio, estos residuos pertenecen al ciclo natural ya que tienen un papel importante en los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza. Los residuos generados vuelven a integrarse en el sistema naturaleza tras ser transformados mediante distintos procesos de degradación. Desde este punto de vista, no suponen una amenaza para el medioambiente ni la vida de las distintas especies que lo habitan. Mientras la cantidad de residuos generados no ha superado la capacidad de asimilación que tiene el planeta, los residuos no han sido un problema. Pero con el desarrollo de las civilizaciones y, especialmente en la actualidad, no solo se ha incrementado desmesuradamente la producción de residuos, sino que se ha modificado la calidad y composición de estos dando lugar a residuos que agravan y retrasan la degradación de los mismos. He aquí la problemática, se producen muchos más residuos de los que el planeta puede asimilar, como consecuencia del afán de consumo, y además son residuos contaminantes y muy difíciles de degradar.

Algunas de las soluciones que se barajan para poder reducir esta inmensa cantidad de residuos son el reciclaje, la reutilización y la valorización. De este modo transformamos un residuo en otra cosa con el mismo fin inicial o para otros fines (reciclaje), damos un nuevo uso igual o distinto a un mismo residuo sin modificarlo (reutilización) o aprovechamos los rechazos generados durante los procesos de producción (valorización).

Dentro de la industria manufacturera, la agroindustria es la principal actividad en Europa. Los principales factores, con respecto a esta industria, que generan problemas en el medioambiente son el consumo de agua y energía, la generación de aguas residuales y la producción de subproductos orgánicos. Estos últimos se generan durante la transformación de la materia prima, siendo mayormente de naturaleza orgánica biodegradable y no peligrosa (García-Morales, 2015). Los principales medios afectados por estos residuos son el suelo y el medio hídrico, tanto superficial como subterráneo. La actividad agroindustrial en el ámbito de la agricultura da lugar a una gran cantidad de residuos, de aproximadamente el 90% del peso total del producto cosechado. Concretamente, en el caso del café, solo se aprovecha económicamente el grano que equivale a un 10% del peso total del fruto fresco (Abarca, 2010).

Según datos del INE (Instituto Nacional de Estadística) del año 2012, con respecto a un total de 14.594.016 toneladas de residuos peligrosos y no peligrosos generados en la industria manufacturera, 734.894 toneladas corresponden a residuos vegetales.

### 1.1.2 Clasificación de los residuos

Según la ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, se entiende como residuo cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar.

Hay muchos criterios para clasificar los tipos de residuos. Atendiendo, a la composición de los residuos, podemos diferenciar tres tipos a groso modo (Planética, 2011):

- Residuos orgánicos: desecho de origen biológico, que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo.
- Residuos inorgánicos: desecho de origen industrial o de cualquier otro proceso no natural es decir, no tiene un origen biológico.
- Residuos peligrosos: todo desecho, ya sea de origen biológico o no, que constituye un peligro potencial y por lo tanto debe ser tratado de forma especial.

Dentro de los residuos orgánicos se diferencian:

- Residuos agrícolas
- Residuos ganaderos
- Residuos agroalimentarios
- Residuos urbanos

Siendo de nuestro interés los residuos agroalimentarios, son aquellos que provienen de la agroindustria o industria agroalimentaria, la cual recoge todas las empresas o actividades dedicadas a la transformación de materias primas agrícolas o ganaderas en productos elaborados o semielaborados. Este sector agroalimentario engloba los procesos de acondicionamiento, conservación y elaboración de todo tipo de alimentos. Los residuos generalmente producidos son aguas residuales con alta carga orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión y, por otro lado, residuos sólidos generalmente biodegradables (García-Morales, 2015).

Estos residuos agroalimentarios se dividen en residuos de origen animal y residuos de origen vegetal. El caso de los posos de café (PDC), basándonos en la Clasificación Nacional de Actividades Económicas y la Lista Europea de Residuos, se pueden definir como residuos orgánicos agroalimentarios de origen vegetal pertenecientes a la actividad económica de la industria manufacturera, concretamente de la industria de la alimentación. Los posos de café están incorporados en el listado europeo de residuos dentro de la categoría de “residuos de la preparación y elaboración de frutas, hortalizas, cereales, aceites comestibles, cacao, café, té y tabaco; producción de conservas, producción de levadura y extracto de levadura, preparación y fermentación de melazas”.

### **1.1.3 Gestión, tratamiento y valorización de los residuos de la Industria Agroalimentaria**

Para minimizar el riesgo de problemas ambientales ocasionados por residuos es necesario llevar a cabo una buena gestión de ellos, las principales alternativas son las siguientes:

- Empleo directo: algunos de los residuos orgánicos pueden ser aprovechados de forma directa:
  - Subproductos de la agroindustria para la alimentación animal.
  - Empleo de lodos de depuración de los residuos líquidos en agricultura.
  - Huesos, cáscaras, pepitas que se utilizan como combustible para la producción de energía.
  - Bagazos como acondicionador del suelo.
- Tratamiento (para la mejora de su gestión): principalmente consiste en separar y/o transformar todos los componentes que forman cada residuo. Hay varios tipos según lo que sea necesario en cada caso:
  - Mecánico: el cual puede consistir en la reducción del tamaño de las partículas del residuo, en la separación para clasificar los residuos según sus características o en la compactación de los materiales.
  - Físico: con este tratamiento se consigue procesar los residuos sin alterar químicamente su composición, algunos de los procesos que se llevan a cabo son dilución, sedimentación, filtración, flotación, centrifugación, tecnologías de membrana...
  - Físicoquímico: en este caso es necesaria la adición de ciertos compuestos químicos para la transformación de los residuos y efluentes, los principales tratamientos utilizados son neutralización, precipitación, adsorción, intercambio iónico y oxidación química.
- Valorización agronómica (tratamientos biológicos): puede ser una valorización agronómica directa o mediante compostaje, o puede servir para la obtención de biogás u otros tipos de biocombustibles.
  - Residuos líquidos: a través de procesos anaeróbicos y/o aeróbicos se consigue obtener un producto apto para el riego.

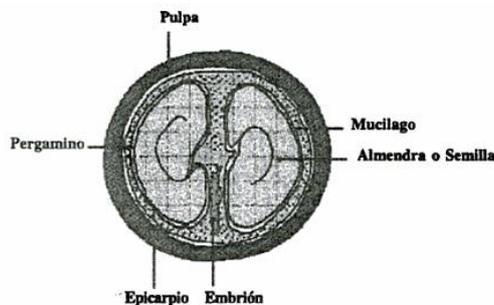
- Residuos sólidos: mediante digestión anaeróbica se consigue realizar compostaje, el cual se usa como fertilizante.
- Valorización energética (carácter de BIOMASA):
  - Procesos bioquímicos: mediante los cuales se producen bioaceites y alcoholes como consecuencia de la acción de los microorganismos, que utilizan la biomasa como sustrato para realizar sus funciones.
  - Procesos termoquímicos: en los que se incluyen la combustión, pirólisis y gasificación. En este caso la fuente de transformación es el calor para obtener biocombustibles.
- Valorización por obtención de productos de valor añadido: a partir de los residuos agroalimentarios podemos conseguir crear muchos otros productos con un alto valor añadido como por ejemplo, la obtención de biosurfactantes y bioadsorbentes a partir de residuos y subproductos de las industrias vitivinícolas y de procesamiento de maíz (Residuos profesional, 2015).

## 1.2 Residuos del café y sus posibilidades de revalorización

### 1.2.1 El café y sus residuos

El café es el nombre de la semilla del cafeto (*Coffea arabica*), un árbol de la familia de las Rubiáceas originario de Etiopía. El término café se ha extendido entendiéndose por él la bebida que se elabora a través de la infusión de la semilla tostada y molida.

El fruto del café maduro está constituido de afuera hacia dentro por las siguientes partes (Figura 1); la pulpa (cubierta roja o amarilla), el mucílago, el pergamino (envoltura cartilaginosa que cubre por separado cada semilla y que constituye el endocarpio), la piel plateada que cubre la almendra, la almendra y el embrión (Ospina, 2001).



**Figura 1.** Estructura de un grano de café (Ospina, 2001).

Los pasos generales para la producción del café según la empresa mexicana “Café La Nacional”, son los siguientes:

- Recolección de los frutos maduros: generalmente de forma manual aunque también se puede hacer de forma mecánica.
- Beneficio: se debe realizar en las primeras 24 horas para evitar una fermentación natural. Existen dos tipos de beneficio. El beneficio húmedo consiste en desgranar el fruto, extraer el mucílago mediante fricción, lavar y secar las semillas de forma natural mediante el sol o con máquinas secadoras. El beneficio seco se basa en almacenar el café, dejar secar durante veinte días al sol y cuando la cáscara, semilla y pulpa están totalmente secas se extraen los granos en las máquinas descascarilladoras. De este modo se consigue el café en pergamino, pero si queremos adquirir el café verde, será necesario el morteo.
  - Morteo: proceso que consiste en hacer pasar el café por unas máquinas dentadas que eliminan el pergamino de los granos.

- Clasificación de los granos según su tamaño y forma.
- Tueste del café verde, es aquí donde se determinará el aroma, sabor y olor del propio café.
- Y para finalizar, se llevará a cabo el molido de los granos de café para facilitar así su posterior uso.

Las diferentes estructuras tisulares del fruto del café dan lugar a la generación de subproductos y residuos. Dependiendo de si el procesado del café se realiza por vía húmeda o seca podemos distinguir cuatro tipos de residuos: la pulpa, la cáscara, la piel de plata y los posos de café.

- Pulpa: es el primer subproducto que se obtiene tras el procesado húmedo de los granos de café, representa el 29% del peso seco del grano. Se compone orgánicamente por taninos (1.8-8.56%), sustancias pépticas (6.5%), azúcares reductores (12.4%), azúcares no reductores (2.0%), cafeína (1.3%), ácido clorogénico (2.6%) y ácido cafeico (1.6%).
- Cáscara: se obtiene a partir del procesado por vía seca de los granos de café, supone el 12% del peso seco del grano. La cáscara está constituida por un 15% humedad, 5.4% ceniza, 7.0% proteína, 0.3% lípidos, y 72.3% de carbohidratos.
- Piel de plata: o también denominada cascarilla, es un subproducto que proviene del proceso de tostado. Principalmente está compuesto por celulosa y hemicelulosa.
- Posos de café (PDC): sedimento que queda como residuo tras la elaboración de la infusión del café. Por cada tonelada de café se genera alrededor de 650 kg de PDC (Ospina, 2001).

### **1.2.2 Alternativas ambientales para los residuos o posos del café.**

El café es una de las bebidas más populares y comerciales del mundo, tanto que incluso es conocida como la bebida socializadora. El promedio en España de consumo de café es de 188.940 toneladas. Cifra aún más importante cuando hablamos de los residuos y subproductos, obtenidos por el procesado y la generación de la infusión. El principal motivo por el que, desde mediados del siglo pasado, se están buscando alternativas al uso de estos residuos y subproductos, es el conjunto de problemas medioambientales que generan como consecuencia de su alta toxicidad. Los posos de café contienen cafeína, taninos, ácido clorogénico y fenoles. Entre algunas alternativas, se encuentran el uso como materia prima para la producción de piensos, bebidas, vinagre, biogás, cafeína, pectina, enzimas pépticos, proteínas y abono (Rathinavelu and Graziosi, 2005). De este modo se conseguiría la reducción de residuos generados a nivel mundial así como la propia contaminación producida por ellos mismos.

En detalle, las alternativas propuestas por Rajkumar Rathinavelu y Giorgio Graziosi en su artículo "*Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café*" son:

- Pienso: la pulpa del café puede reemplazar parte de los concentrados comerciales para la alimentación del ganado lechero. Pero para que esto no sea perjudicial para la salud, tanto del propio animal como posteriormente del ser humano que la ingiere, no se debe superar una adicción mayor al 20%, dependiendo del animal que se trate.
- Biogás: el agua drenada del extracto de la cera del café puede ser utilizado para la producción de biogás.
- Ensilaje: los sólidos de la pulpa de café puede usarse como un conservante del forraje que posteriormente consumirá el ganado.
- Setas: la pulpa una vez fermentada y secada parcialmente puede usarse como sustrato para el cultivo de setas exóticas.
- Combustible: debido a que la cáscara de los granos de café está constituida básicamente por lignocelulosa puede usarse como combustible.
- Estiércol: los sólidos de la pulpa de café dan lugar a una buena fuente de humus y de carbono orgánico para el suelo y las plantas.
- Bebidas alcohólicas y refrescantes: aún se ha descubierto poco sobre esto.

- Sustancias: de los mucílago de café podemos obtener pectinas sin refinar, azúcares naturales del fruto del café, compuesto antioxidantes y pro antocianinas incoloras.

La adición al suelo de los posos de café es por tanto una posible alternativa ambiental para estos residuos. Tradicionalmente, aunque sin control analítico, los posos de café se han usado como abonos para la mejora de la fertilidad química en pequeños huertos y, frecuentemente, en las macetas de muchos hogares. Pero la adición de los posos de café al suelo como enmienda orgánica cobra mayor interés, si cabe, teniendo en cuenta el estado de degradación que sufren los suelos en general, y en particular los suelos mediterráneos (Rodríguez Martín et al., 2016). Estos tienen un porcentaje muy bajo de materia orgánica (en promedio <1% de carbono orgánico) como consecuencia de su desmedida explotación y mal uso. Conocer los efectos de la adición de estos residuos sobre las propiedades químicas y físicas es prioritario antes de adoptar una decisión. En esta línea se enmarca el presente trabajo, incluido en un proyecto más ambicioso, que pretende conocer las ventajas e inconvenientes de adicionar posos de café como enmienda orgánica para suelos mediterráneos. Es una opción para manejar ambientalmente residuos orgánicos con posibles beneficios para la calidad del suelo.

Si bien la tradición ha considerado que la adición de posos de café al suelo favorece su fertilidad química, especialmente en suelos calcáreos, lo cierto es que apenas existen investigaciones rigurosas al respecto. Esta falta de datos experimentales es aún más deficiente en el caso de la fertilidad física. Hasta el momento, se desconocen los efectos que los posos de café, una vez adicionados al suelo, podrían tener sobre las propiedades edáficas relacionadas con la estructura y agua del suelo.

### **1.3 Estructura del suelo y sus propiedades derivadas**

#### **1.3.1 Estructura del suelo**

La estructura del suelo hace referencia a la organización de las partículas sólidas en agregados y la consecuente generación de poros (Wild, 1992). Se trata de una de las características más importantes del suelo, ya que influye directamente sobre varias propiedades físicas con incidencia en la fertilidad. De la estructura depende la facilidad para la circulación de las soluciones nutritivas e intercambio de gases, así como la disponibilidad de espacios para la penetración de raíces y hábitat de microorganismos. Para poder comprender mejor el significado de estructura es necesario conocer antes dos términos esenciales; agregados y poros.

**Agregado:** unidad tridimensional formada por un conjunto de partículas individuales del suelo dando lugar a terrones y grumos unidos por material coloidal y que poseen cierta organización interna y forma externa característica.

**Poros:** espacios irregulares, no rígidos, interconectados entre sí por los que circula el agua y el aire. Se clasifican según su tamaño como capilares, microporos y macroporos.

La definición de estructura incluye el tamaño y la manera de agregarse de forma natural y estable de las partículas individuales, así como el espacio de huecos de distintos tamaños que lleva asociada esta organización en agregados (Porta, 2008). La disposición de estos agregados y de los poros da lugar a una estructura característica en cada suelo. Se considera que un suelo sin estructura no es favorable para el crecimiento de las plantas (Wild, 1992).

Las partículas de los agregados del suelo se unen de forma más o menos estable por agentes de enlace químico tales como la coagulación de arcillas, formación de complejos organo-minerales, cementos constituidos de productos orgánicos adhesivos o productos minerales precipitados a partir de solutos y, asimismo, por las ataduras físicas que suponen la acción de raíces e hifas de hongos (Bronick and Lal, 2005). De la efectividad de esta unión dependen un conjunto de propiedades físicas que controlan la funcionalidad del suelo asociada a la estructura. Entre ellas, algunas de las más importantes son la estabilidad de agregados, la densidad aparente y la retención de agua a potenciales que permiten el agua útil para las plantas.

### **1.3.2 Estabilidad estructural**

En caso de que la estructura del suelo se deshaga, ello supone una limitación para el crecimiento de las plantas. Un colapso de la estructura impide la retención, disponibilidad y movimiento del agua. La actividad biológica también se restringe por falta de hábitat y oxigenación (Wild, 1992). Muchos son los procesos que pueden dar lugar a la rotura y dispersión de los agregados y, como consecuencia, a la destrucción y compresión de los poros. La mayoría procede de fuerzas ambientales naturales como impacto de las gotas de lluvia, congelación o mojado rápido de materiales secos, y otras derivan del manejo del suelo. Por ejemplo, el laboreo agrícola con maquinaria pesada o el riego con aguas de alta concentración electrolítica producen impactos negativos sobre la estructura, provocando su compactación o desmoronamiento (dispersión de las partículas), respectivamente (Wild, 1992). La actuación directa del hombre sobre los suelos, especialmente en el ámbito de la agricultura, modifica la forma, la estabilidad y, aún más importante, la capacidad del suelo para restaurar la condición estructural (Amézqueta, 1999; Volverás, 2009).

Es por ello que uno de los parámetros a tener en cuenta para catalogar la fertilidad física del suelo es la estabilidad de los agregados, también denominada estabilidad estructural. Ella se define como la resistencia de los agregados a la rotura o compresión frente a fuerzas externas como la humectación y la compactación (Sánchez-Marañón et al., 2011). Especialmente, la estabilidad o persistencia de los agregados en agua influye sobre el crecimiento de las plantas, transporte de agua y aire, actividad biológica, erosionabilidad, y formación de costras superficiales. De nada sirve la funcionalidad estructural del suelo si cuando este se moja los agregados colapsan y dispersan, eliminando la porosidad preexistente. Al desagregarse las partículas del suelo, estas tienen también más riesgo de erosionarse y de empaquetarse formando costras que impiden la infiltración del agua y la emergencia de semillas. Por esta razón, la estabilidad de los agregados es un indicador esencial para diagnosticar la calidad dinámica del suelo o la capacidad del mismo para desarrollar sus funciones ecológicas y productivas (Doran and Parkin, 2006).

La resistencia de los agregados a la humectación depende esencialmente de la composición catiónica de la solución del suelo y de aspectos organizativos de la fábrica del suelo, incluyendo tamaño, forma, organización y uniones de las partículas (Porta, 2008; Sánchez-Marañón et al., 2011). En estas uniones juega un papel destacado los cementos húmicos y la acción de microorganismos como generadores de productos mucilaginosos.

En ambientes naturales, la materia orgánica del suelo favorece la estabilidad de los agregados. Por una parte interviene como agente cementante, dado que los compuestos húmicos puentean las partículas minerales o incluso las tapizan favoreciendo una unión duradera. Por otra parte, la materia orgánica incentiva la actividad biológica que, específicamente en el caso de bacterias, produce segregaciones tales como los mucopolisacáridos derivados de la metabolización de residuos orgánicos, que actúan como pegamentos para fortalecer la unión de las partículas minerales que forman los agregados (Wild, 1992). Si la adición de posos de café al suelo tuviera un efecto similar al de la materia orgánica en suelos naturales, ello podría contribuir a mejorar la estabilidad estructural de suelos mediterráneos, en especial aquellos con mayor presión antrópica y de menor contenido de materia orgánica.

### **1.3.3 Densidad aparente**

Otra de las propiedades físicas derivadas de la estructura es la densidad aparente, la cual se define como la masa de sólidos respecto al volumen inalterado de suelo seco (volumen de sólidos + volumen de poros) (Porta, 2008). Cuanto mayor es el volumen de poros, menor es la densidad aparente. En general, suelos bien estructurados dan lugar a un mayor volumen de poros y, consecuentemente, disminuye su densidad aparente. Es por ello que aunque no es una medida directa de porosidad (volumen de huecos con respecto al volumen total), es un buen estimador del espacio poroso del suelo (Liu et al., 2016).

Suelos naturales con alto contenido de materia orgánica y por tanto con actividad biológica, disponen de un mejor espacio poroso. Cabe investigar si la adición de los restos orgánicos de los posos de café tendría un efecto similar en los suelos.

### 1.3.4 Retención de agua y agua útil

El agua del suelo se encuentra bajo la acción de ciertos potenciales energéticos, esencialmente de tipo matricial, debido a las fuerzas de cohesión entre moléculas de agua y fuerzas de adhesión de estas a la superficie de las partículas coloidales. Ello repercute en la retención de agua del suelo. El estudio del agua del suelo se refiere, por tanto, no sólo a la cantidad de agua sino también a la fuerza con la que esa agua está retenida en el suelo.

Los puntos más críticos de retención de agua son aquellos que corresponden a un potencial energético de -33 kPa y -1500 kPa. Según se muestra en la Figura 2, entre estos dos potenciales se encuentra el agua útil o máxima cantidad de agua que las plantas pueden extraer de un perfil de suelo, entendiéndose como la cantidad de agua que retiene un suelo entre su situación a capacidad de campo, o agua retenida a -33 kPa, y su punto de marchitamiento permanente, o agua retenida a -1500 kPa (Wild, 1992). La capacidad de campo es la cantidad de agua retenida en el suelo tras saturarse y una vez el movimiento gravitacional del agua es tan pequeño que la cantidad de agua se estabiliza. Experimentalmente se determinó que un valor de -33 kPa es la presión necesaria para determinar el agua a capacidad de campo y, asimismo, se atribuyó un potencial de -1500 kPa para el punto de marchitez permanente (sin agua capilar), refiriéndose a un agua almacenada en el suelo que las plantas no pueden absorber.

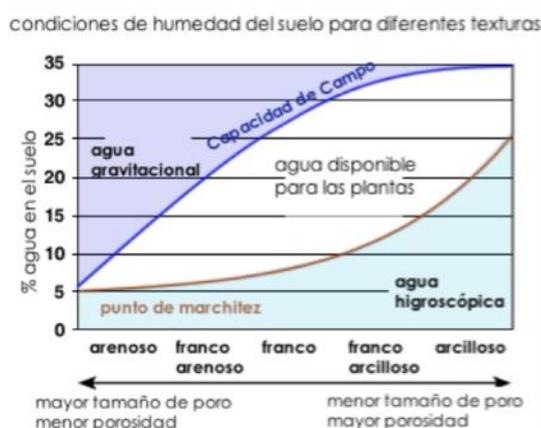


Figura 2. Límites del agua útil (auladeagricultura, 2015)

La curva de retención de agua del suelo y por tanto, las cantidades de agua a diferentes potenciales energéticos, depende fundamentalmente de la textura del suelo, la cantidad y tipo de arcilla, la cantidad y tipo de materia orgánica y, finalmente, también de la estructura (Schaeztl and Anderson, 2005; Campbell, et al., 2013). Estructuras con poros comprendidos entre 50 y 0.2  $\mu\text{m}$ , son las que disponen de más agua de almacenamiento o agua capilar útil, mientras que por debajo de 0.2  $\mu\text{m}$ , el agua está retenida a punto de marchitamiento. Se trata de un agua higroscópica. Dado que la adición de posos de café aporta material orgánico y puede modificar la densidad aparente, cabe estudiar si se potencian o no los poros de almacenamiento de agua.

## 2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de los posos del café (PDC), sobre algunas de las propiedades de los suelos que determinan la fertilidad física, en dos tipos de suelos mediterráneos agrícolas. El interés es conocer su efecto sobre la estructura del suelo, midiendo algunas de sus propiedades derivadas. Las propiedades que se analizarán son: el porcentaje de agregados de distintos tamaños, la estabilidad estructural de estos agregados, la densidad aparente, la retención de agua por el suelo a distintos potenciales (-33 kPa y -1500 kPa) y la cantidad de agua utilizable por las plantas. Se pretende determinar la magnitud de variación que se produce en cada una de las propiedades mencionadas en función de la aplicación de tres cantidades distintas de posos de café (0%, 2,5% y 10%) a cada uno de los suelos ensayados, con o sin cultivo de planta, y teniendo en cuenta el tiempo transcurrido (0, 30 y 60 días).

Otro objetivo es analizar estadísticamente los resultados de las propiedades físicas estudiadas, incluyendo también propiedades químicas [pH, N (%), C/N, CE (dS/cm), C.O. (%) y  $\text{CO}_3^{2-}$  (%)] de estos mismos suelos. Aunque las propiedades químicas se determinaron en un ensayo previo dentro del proyecto de investigación en el cual se inserta mi Trabajo Fin de Grado (TFG), se optó por incluir estos datos en algunos de los análisis estadísticos realizados. Su objeto fue mejorar la interpretación de los datos obtenidos sobre las propiedades físicas y estudiar conjuntamente la variabilidad del sistema suelo + café.

Un tercer objetivo es ilustrar en una primera aproximación, la morfología de los agregados de suelo, con y sin adición de café, empleando un estereomicroscopio. Y también, profundizar mediante imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM), en los procesos ultramicroscópicos que contribuyen a la variación de las propiedades físicas analizadas en este trabajo.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1 Ensayo

Esta línea de investigación centrada en el uso de los posos de café como enmienda orgánica de suelos, comienza con el muestreo de la capa arable (20cm) de dos tipos de suelos agrícolas mediterráneos; un suelo rojo y un suelo de vega. A ellos se les adicionan diferentes dosis de PDC (0%, 2,5% y 10%) y se prueban dos modalidades de ensayo in vitro, con cultivo de planta o sin cultivo. Se toman los datos obtenidos en cuanto a varias propiedades derivadas de la estructura del suelo en función del tiempo transcurrido (0, 30 y 60 días).

Los distintos factores, con sus respectivos niveles, que intervienen en el ensayo son los siguientes.

##### 3.1.1 Suelos

- Nivel 1: suelo de vega (Figura 3), estas muestras pertenecen a una zona de la Vega de Granada, más concretamente en las cercanías de Pinos Puente. Está clasificado como un Inceptisol (Soil Taxonomy), caracterizado por tener textura franco-limosa, gran espesor y contener cultivos de maíz y alfalfa. Actualmente permanece en régimen de agricultura orgánica, así se pretende conseguir evitar el uso de abonos inorgánicos durante 10 años.



**Figura 3.** Perfil del suelo de vega y zona de extracción.

- Nivel 2: suelo rojo (Figura 4), se localiza en las inmediaciones del Padul. Actualmente su principal uso es el cultivo de cereales. Se clasifica como un Alfisol (Soil Taxonomy), caracterizado por su elevado espesor y texturas muy cambiantes en función de la profundidad. En el caso exacto de la zona muestreada la textura es de tipo arcillosa-francoarcillosa.



**Figura 4.** Perfil del suelo rojo y zona de extracción.

### 3.1.2 Café

El café empleado proviene de la empresa Cafés Cumbal. Dentro de la gran variedad de tipos y modalidades, se utilizó café en grano PREMIUM TUESTE NATURAL (Figura 5), proveniente de una combinación de cafés de Centro América y África Oriental, caracterizado por un tueste 100% natural. Una vez utilizado para la obtención de la bebida, el residuo o PDC se adicionó a las muestras de suelo.

Dentro del factor café se diferencian tres niveles:

- Nivel 1: adición de un 0% de PDC.
- Nivel 2: adición de un 2,5% de PDC.
- Nivel 3: adición de un 10% de PDC.



**Figura 5.** Presentación comercial del café empleado.

### 3.1.3 Planta

Las mismas muestras de suelo se ensayaron con y sin planta. Para aquellas muestras en las que el experimento se llevó a cabo con planta se utilizó *L.sativa* var. Longifolia (Little Gem Duende), una variedad de lechuga proveniente de los viveros SALIPLANT. Forma parte de la familia Astraceae, pueden ser plantas anuales o bianuales, lampiñas, con tallos ramificados, pueden alcanzar hasta un metro de altura y desarrollan hojas grandes y erguidas.

Se diferencian dos niveles:

- Nivel 1: muestras con cultivo de *L.sativa* var. Longifolia.
- Nivel 2: muestra incubada sin planta.

### 3.1.4 Tiempo

Los datos recogidos de cada propiedad se han obtenidos en función del tiempo. Se consideraron tres niveles:

- Nivel 1: a los 0 días.
- Nivel 2: a los 30 días.
- Nivel3: a los 60 días.

## 3.2 Materiales y métodos analíticos

### 3.2.1 Muestras

Inicialmente se parte de 26 muestras que tienen las siguientes características (Tabla 1):

**Tabla 1.** Características de las muestras. En la primera columna aparece el número de maceta según el ensayo anteriormente comentado. En la segunda columna la abreviatura de las características de cada muestra. Y en la

tercera, la explicación de dicha abreviatura que corresponde a las condiciones experimentales en las que se ha llevado a cabo cada muestra. En total se han estudiado 26 muestras.

Nº Maceta	Muestra	Condiciones experimentales
V0	V-0	Suelo Vega original
R0	R-0	Suelo rojo original
2	V-0-2(30)	Suelo de vega sin adición. 2ª réplica a 30 días
5	V-0-2(60)	Suelo de vega sin adición. 2ª réplica a 60 días
8	V-2,5-2(30)	Suelo de vega con 2,5%. 2ª réplica a 30 días
11	V-2,5-2(60)	Suelo de vega con 2,5%. 2ª réplica a 60 días
14	V-10-2(30)	Suelo de vega con 10%. 2ª réplica a 30 días
17	V-10-2(60)	Suelo de vega con 10%. 2ª réplica a 60 días
20	R-0-2(30)	Suelo rojo sin adición. 2ª réplica a 30 días
23	R-0-2(60)	Suelo rojo sin adición. 2ª réplica a 60 días
26	R-2,5-2(30)	Suelo rojo con 2,5%. 2ª réplica a 30 días
29	R-2,5-2(60)	Suelo rojo con 2,5%. 2ª réplica a 60 días
32	R-10-2(30)	Suelo rojo con 10%. 2ª réplica a 30 días
35	R-10-2(60)	Suelo rojo con 10%. 2ª réplica a 60 días
41	pV-0-2(30)	Suelo de vega sin adición y planta. 2ª réplica a 30 días
47	pV-0-2(60)	Suelo de vega sin adición y planta. 2ª réplica a 60 días
53	pV-2,5-2(30)	Suelo de vega con 2,5% y planta 2ª réplica a 30 días
59	pV-2,5-2(60)	Suelo de vega con 2,5% y planta 2ª réplica a 60 días
65	pV-10-2(30)	Suelo de vega con 10% y planta 2ª réplica a 30 días
71	pV-10-2(60)	Suelo de vega con 10% y planta 2ª réplica a 60 días
77	pR-0-2(30)	Suelo rojo sin adición y planta 2ª réplica a 30 días
83	pR-0-2(60)	Suelo rojo sin adición y planta 2ª réplica a 60 días
89	pR-2,5-2(30)	Suelo rojo con 2,5% y planta 2ª réplica a 30 días
95	pR-2,5-2(60)	Suelo rojo con 2,5% y planta 2ª réplica a 60 días
101	pR-10-2(30)	Suelo rojo con 10% y planta 2ª réplica a 30 días
107	pR-10-2(60)	Suelo rojo con 10% y planta 2ª réplica a 60 días

### 3.2.2 Fraccionamiento de los agregados

Este proceso se realizó a las muestras de suelo ya clasificadas según el tipo de suelo, la modalidad, el tiempo y el porcentaje de PDC adicionado. Se llevó a cabo mediante tamizado, se utilizaron cinco tamices con distintos tamaños de luz de malla; 50, 100, 250, 500 y 1000  $\mu\text{m}$ . Las fracciones de cada muestra, incluyendo el rechazo, se almacenaron en tubos de ensayo cerrados con tapón roscado. La cantidad de suelo que se tamizó fue aproximadamente de 10 gramos cada muestra, para con ello obtener la cantidad necesaria que requiere los siguientes procedimientos. En algunos casos, los 10 gramos dio cantidades insuficientes para alguno de los tamaños de agregados, por lo que hubo que repetir el proceso hasta conseguir la cantidad adecuada. Finalmente se obtuvieron tres grupos de tamaño, de los cuales los dos primeros fueron empleados para nuestro ensayo:

- agregados con un tamaño superior a 1000  $\mu\text{m}$ .
- agregados con un tamaño entre 1000-250  $\mu\text{m}$ .
- agregados con un tamaño inferior a 250  $\mu\text{m}$

### 3.2.3 Medición de la estabilidad estructural

Este ensayo se realizó en el laboratorio. Para ello se ha utilizado un equipo para determinar la estabilidad de los agregados “wet sieving apparatus” de la marca Eijkelkamp (Figura 6). El equipo está constituido por una máquina tamizadora con 8 vasos de un tamaño de 39\*39 cm con una luz de malla de 0.250mm y una superficie de tamiz de 10,2 cm<sup>2</sup>. También dispone de 16 recipientes de acero inoxidable con un tamaño de 64\*45mm que se posicionarán debajo de los tamices para recoger las sustancias tamizadas. El funcionamiento de este equipo se basa en un movimiento vertical (bajando y subiendo continuamente) del piso que contiene los tamices, produciendo al final de la subida un corto pero brusco movimiento giratorio.



**Figura 6.** Equipo para determinar la estabilidad de los agregados “wet sieving apparatus” de la marca Eijkelkamp.

El procedimiento que hemos seguido ha sido el siguiente:

1. Enumerar del 1 al 8 los tamices y del 1 al 16 los recipientes de acero inoxidable.
2. Tarar el peso de los 16 recipientes.
3. Pesar alrededor de 4 gramos de las primeras 8 muestras de tamaño >1000 $\mu$ m.
4. Depositar la cantidad anterior de cada muestra en un tamiz enumerado.
5. Colocar, bajo los tamices, los 8 primeros recipientes de acero. Y rellenarlos con 80 ml, aproximadamente, de agua destilada.
6. Antes de poner en marcha el equipo humedecer las muestras en los tamices y dejar reposar 5 minutos para facilitar el tamizado.
7. Poner en marcha el equipo durante 3 min.
8. Retirar los recipientes de acero con el agua destilada más la cantidad de muestra tamizada. Y llevar a la estufa a una temperatura de 105 grados durante 24 horas.
9. Volver a repetir el mismo proceso hasta el punto 5, pero en este caso se usarán los recipientes de acero inoxidable enumerados del 9 al 16 y se rellenarán con aproximadamente 80 ml de una disolución al 20% de HxNa. La función de esta disolución es la de romper todos los agregados por completo para que se tamice todo el suelo quedando los granos de arena en la parte superior del tamiz.
10. Se repite el paso 6, y después se pone en marcha el equipo durante 15 minutos. Una vez transcurrido este tiempo fue necesario con la ayuda de una varilla favorecer la disgregación para así facilitar el tamizado. Volver a poner en funcionamiento el equipo durante 5 minutos más. Una vez finalizado el tiempo necesario, antes de retirar las cápsulas de acero, enjuagar los tamices con agua destilada para evitar pérdidas de muestra. Y de nuevo introduciremos los recipientes de acero en la estufa a 108°C durante 24 horas.

11. Por último, transcurridas las 24 horas, pesar cada cápsula. Enjuagar todos los recipientes de acero inoxidable así como los tamices y volver a repetir el proceso con las siguientes 8 muestras. Una vez completadas todas, se volvió a repetir todo el proceso para los agregados con un tamaño que comprende entre 250-1000µm.

Tras recoger todos los datos obtenidos y plasmarlos en una base de datos, se hicieron los cálculos necesarios para obtener el porcentaje de agregados estables en cada muestra y para cada tamaño de agregado. Los cálculos consisten en:

Peso en agua = Tara de la cápsula – peso de la cápsula tras la estufa.

Peso en HxNa = Tara de la cápsula – Peso de la cápsula tras la estufa.

Peso HxNa corregido = Peso en HxNa – 0.16

$$\% \text{ Agregados estables} = \frac{\text{Peso HxNa corregido}}{(\text{Peso HxNa corregido} + \text{Peso en agua})} * 100$$

### 3.2.4 Retención de agua

Se ha medido la cantidad de agua retenida en las distintas muestras a dos presiones; a -33kPa con el que se calcula la capacidad de campo (CC) y a -1500kPa para obtener el punto de marchitamiento permanente (PM). Para ello se ha empleado el método de la membrana de Richard y se han usada dos ollas de presión una a -33kPa (Figura 7) y otra a -1500kPa. Estos valores junto a otros que explicaremos a continuación se han utilizado para obtener el valor de agua útil.



Figura 7. Olla de presión a -33kPa.

### 3.2.5 Densidad Aparente (Da)

Para medir esta propiedad se ha utilizado un tubo de vidrio de volumen conocido. Se introduce el tubo de vidrio en un tubo de goma para poder golpearlo contra la mesa (Figura 8). Se llena el de vidrio de la muestra a tratar y se golpea 20 veces dejando caer el conjunto de los tubos contra la mesa, desde una altura de 5cm. Tras esto se vuelve a rellenar el tubo de vidrio y posteriormente se pesa todo el conjunto. Como previamente se taró el peso del tubo y de la goma, y se sabe el volumen del tubo de vidrio, podemos calcular la densidad aparente de cada una de las muestras.



**Figura 8.** Tubo de vidrio de volumen conocido y tubo de goma.

### 3.2.6 Agua útil (*Au*)

El agua útil se calcula partir de los datos anteriores empleando la siguiente fórmula:

$$Au = \frac{(CC - PM) * Da}{10}$$

Donde: CC = H% a -33kPa; PM = H% A -1500kPa y Da = densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

### 3.3 Materiales y métodos para el análisis estadístico

Se ha realizado un análisis estadístico de los datos de todas las variables empleadas en este ensayo. Para ello se ha utilizado el paquete estadístico del programa informático Statgraphics Centurion v.16.1.15.

En este análisis se calcularon, en primer lugar, estadísticos descriptivos de tendencia central, variabilidad y forma de la curva Gaussiana que mejor se ajusta a los datos de cada uno de los parámetros analizados en las 26 muestras. Su objeto fue estudiar la fiabilidad de los datos y comprobar los requerimientos de normalidad que dan validez de los test estadísticos. En segundo lugar, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) simple y multifactorial, un análisis de correlación y un análisis factorial. Su objeto fue estudiar los factores de variación de las propiedades físicas, analizar las relaciones entre propiedades físicas y químicas, y resumir el sistema suelo-café en unas pocas dimensiones que expliquen la mayor parte de la variabilidad de dicho sistema.

En los análisis de correlación y factorial se incluyeron tanto las propiedades físicas determinadas en este TFG, así como datos químicos y fisicoquímicos ya disponibles en el proyecto de investigación donde se enmarca el presente trabajo. La Tabla 2 recoge los valores originales de los datos químicos y fisicoquímicos, que han sido tratados estadísticamente en este TFG.

**Tabla 2.** Propiedades químicas y fisicoquímicas. Estos datos han sido tomados del trabajo fin de grado: Valoración Química Agrícola de los Residuos del Café: primeros ensayos en suelo-planta. De la graduada en ciencias y tecnología de los alimentos, Ana Gloria Cervera Mata, expuesto en Septiembre de 2015 (Com.Pers).

Muestra	pH	CE (dS/m)	C.O. (%)	N (%)	C/N
V-0	8,2	1,3	1,36	0,105	13
R-0	7,2	0,6	1,16	0,113	10
V-0-2(30)	8,2	1,0	1,39	0,089	16
V-0-2(60)	8,1	1,0	1,37	0,090	15
V-2,5-2(30)	8,3	0,6	2,51	0,137	18
V-2,5-2(60)	8,4	0,6	2,53	0,182	14
V-10-2(30)	8,0	0,7	6,11	0,301	20

V-10-2(60)	8,0	0,9	5,42	0,266	20
R-0-2(30)	7,4	0,6	0,99	0,094	10
R-0-2(60)	7,4	0,7	1,09	0,090	12
R-2,5-2(30)	7,4	0,2	2,46	0,149	17
R-2,5-2(60)	7,4	0,3	2,20	0,122	18
R-10-2(30)	6,7	0,3	4,51	0,261	17
R-10-2(60)	6,7	0,3	5,51	0,302	18
pV-0-2(30)	8,5	0,6	1,50	0,130	12
pV-0-2(60)	8,5	0,4	1,98	0,133	15
pV-2,5-2(30)	8,4	0,7	2,70	0,145	19
pV-2,5-2(60)	8,4	0,7	2,92	0,302	10
pV-10-2(30)	8,2	0,8	5,63	0,302	19
pV-10-2(60)	8,0	1,0	5,31	0,356	15
pR-0-2(30)	7,7	0,2	1,37	0,097	14
pR-0-2(60)	7,5	0,2	1,33	0,123	11
pR-2,5-2(30)	7,4	0,2	2,31	0,184	13
pR-2,5-2(60)	7,4	0,3	2,23	0,161	14
pR-10-2(30)	6,8	0,3	2,97	0,302	10
pR-10-2(60)	6,9	0,4	4,13	0,245	17

### **3.4 Materiales y métodos morfológicos**

Para la realización de las imágenes estereomicroscópicas se ha utilizado un Estereomicroscopio Olympus SZX12.

Para la microscopía electrónica de barrido (SEM) se ha utilizado un Microscopio Electrónico de Barrido de Presión Variable, de Alta Resolución (FESEM) Zeiss SUPRA40VP (Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

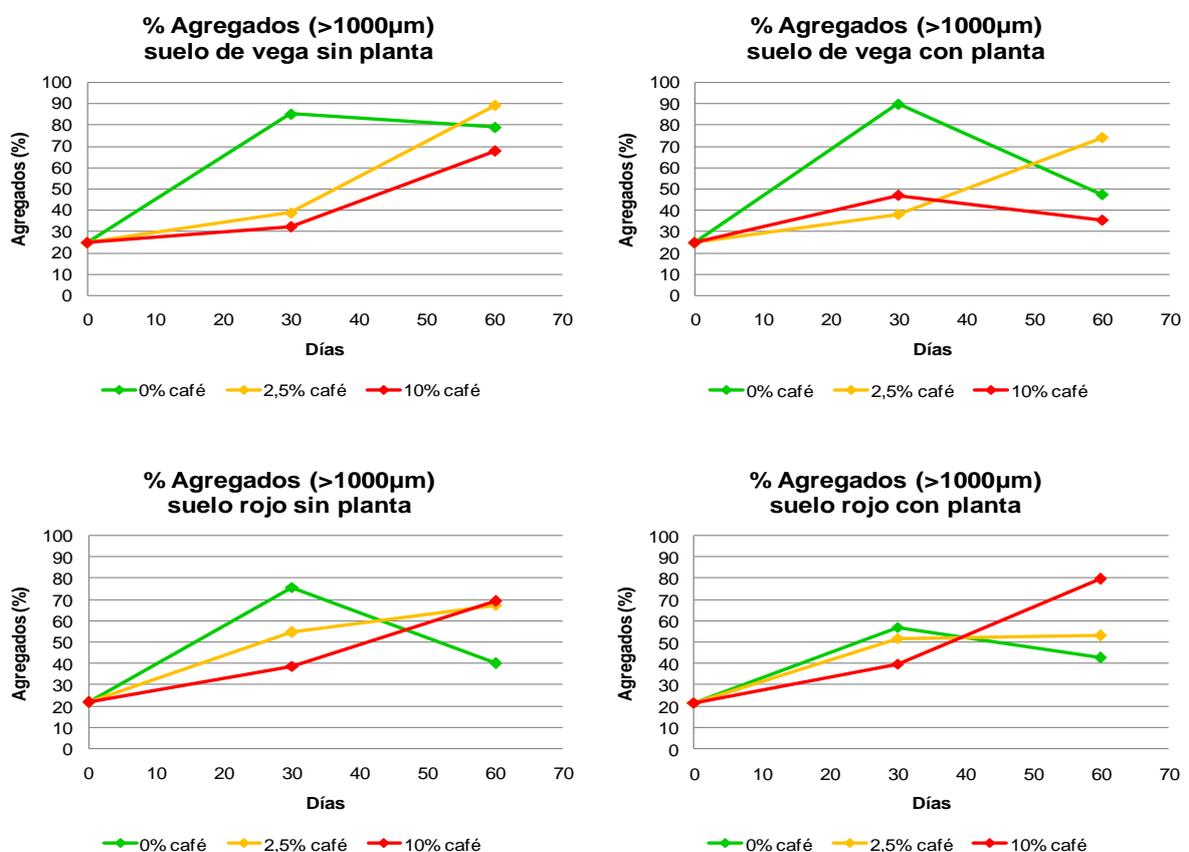
En primer lugar señalar que no existen muchos trabajos de investigación específicos que estudien la influencia de los residuos del café sobre las propiedades físicas del suelo. Tan solo en el trabajo de Kasongo et al., 2011 se refiere que la adición de los posos mejora la retención de agua entre un 53 y 60%, pero estos datos no pueden ser comparados con los del presente estudio porque la metodología empleada es muy diferente. En el trabajo citado, ese mayor contenido de agua se establece mediante la pesada de una columna de suelo pero sin especificar el potencial al cual se retiene esa agua, por tanto se puede decir que existe una coincidencia en cuanto a resultados pero nada más. Por lo que, enfocaremos esta discusión de resultados en el comentario de las principales consecuencias de la adición de café y cuáles son las relaciones más interesantes entre las distintas propiedades estudiadas.

Este estudio principalmente se ha centrado en tres propiedades físicas del suelo que son las siguientes: estabilidad estructural, retención de agua y densidad aparente. Con este experimento podemos discutir si realmente la adición de posos de café al suelo genera aspectos positivos o negativos. Además, teniendo en cuenta ciertas propiedades químicas y fisicoquímicas ya analizadas anteriormente en la misma línea de investigación, ello nos ayudará a comprender e interpretar las modificaciones de las propiedades físicas. Nos proporciona datos muy interesantes que animan a seguir con la investigación.

### 4.1 Propiedades físicas de las muestras de suelo

#### 4.1.1 Fraccionamiento de los agregados por tamaño

- Porcentaje de agregados con un tamaño  $> 1000\mu\text{m}$  (Figura 9).



**Figura 9.** Porcentaje de agregados con un tamaño superior a 1000 micrómetros en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos, así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

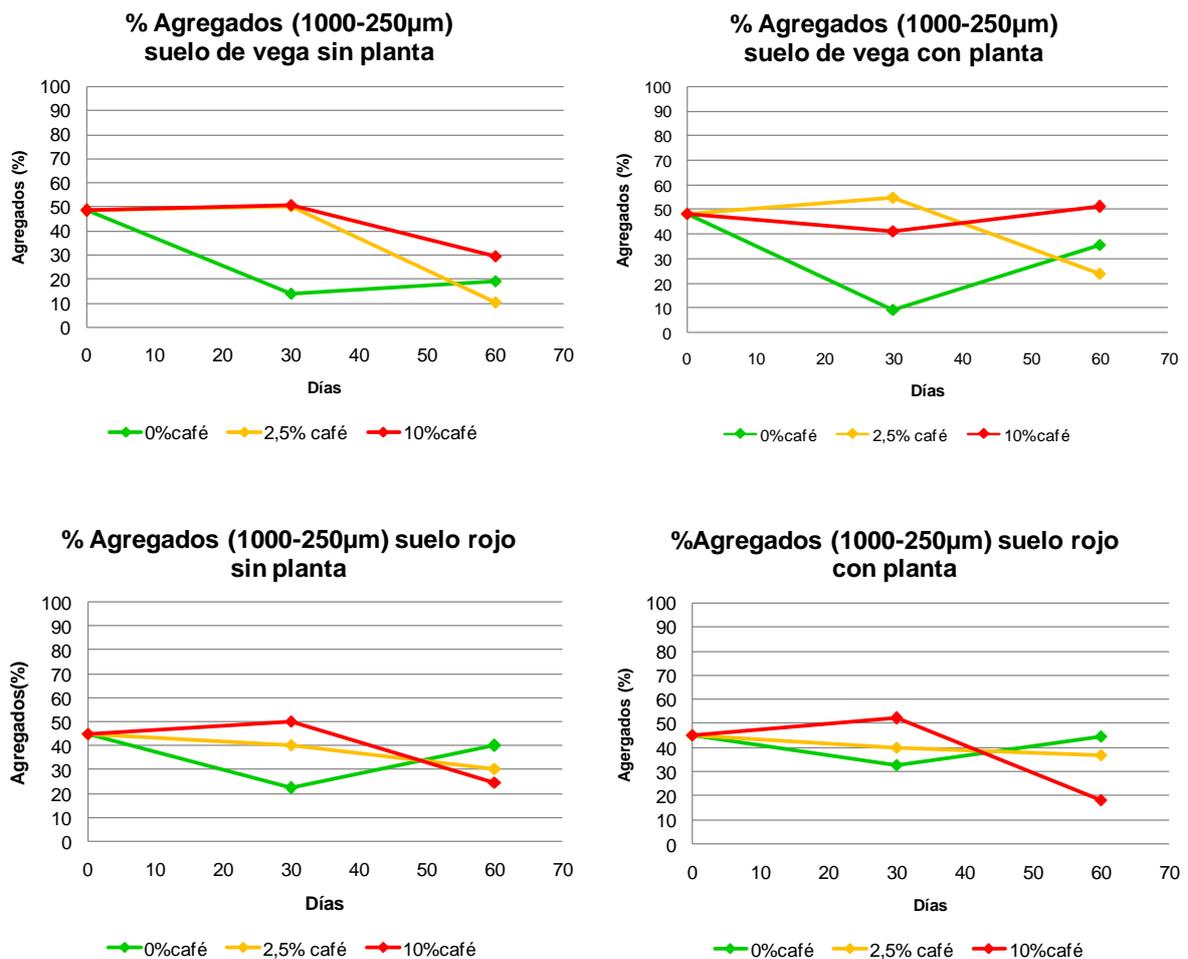
En suelo de vega sin planta: con respecto al valor inicial, durante los primeros 30 días, el porcentaje de agregados con un tamaño superior a 1000  $\mu\text{m}$  incrementa alrededor de un 60% cuando no se le añade café. En los casos donde se añade un 2,5% y un 10% de café, se produce un incremento muy leve durante los primeros 30 días. Sin embargo, transcurridos 60 días, se aprecia un aumento considerable en los casos con adición de café llegando incluso a un 90% de agregados en suelos con un 2,5% de café, superando el valor del suelo sin café que se mantiene en torno al 80%.

En suelo de vega con planta: durante los 30 primeros días, se produce un incremento en las tres muestras con distinto contenido de PDC, aunque mucho más pronunciado en el caso sin café. Pero en los 30 días siguientes, el caso de 0% de café desciende bruscamente y aumenta considerablemente el suelo con un 2,5% de café alcanzando un valor que supera el 70%.

En suelo rojo sin planta: con respecto al valor inicial, a los 30 días, en los tres casos aumenta progresivamente, siendo el valor más alto el perteneciente a la muestra con un 0% de café. A los 60 días, el suelo con un 0% de café disminuye bruscamente su valor aunque se queda por encima del valor inicial, la muestra con un 2,5% de café aumenta levemente. Y en el caso del 10% de café, aumenta considerablemente hasta conseguir alcanzar el valor más alto en torno al 70% de agregados con un tamaño superior a 1000  $\mu\text{m}$ .

El suelo rojo con planta: presenta el mismo comportamiento que sin planta pero con una diferencia, en este caso, durante los primeros 30 días, el incremento de agregados cuando no se añade café es mucho más suave aunque sigue siendo el valor más alto. Y sin embargo, en los siguientes 30 días el aumento de agregados cuando se añade un 10% de café es mucho más pronunciado alcanzado un 80% de agregados con un tamaño superior a 1000  $\mu\text{m}$ .

- Porcentaje de agregados con un tamaño entre 250-1000 $\mu\text{m}$  (Figura 10).



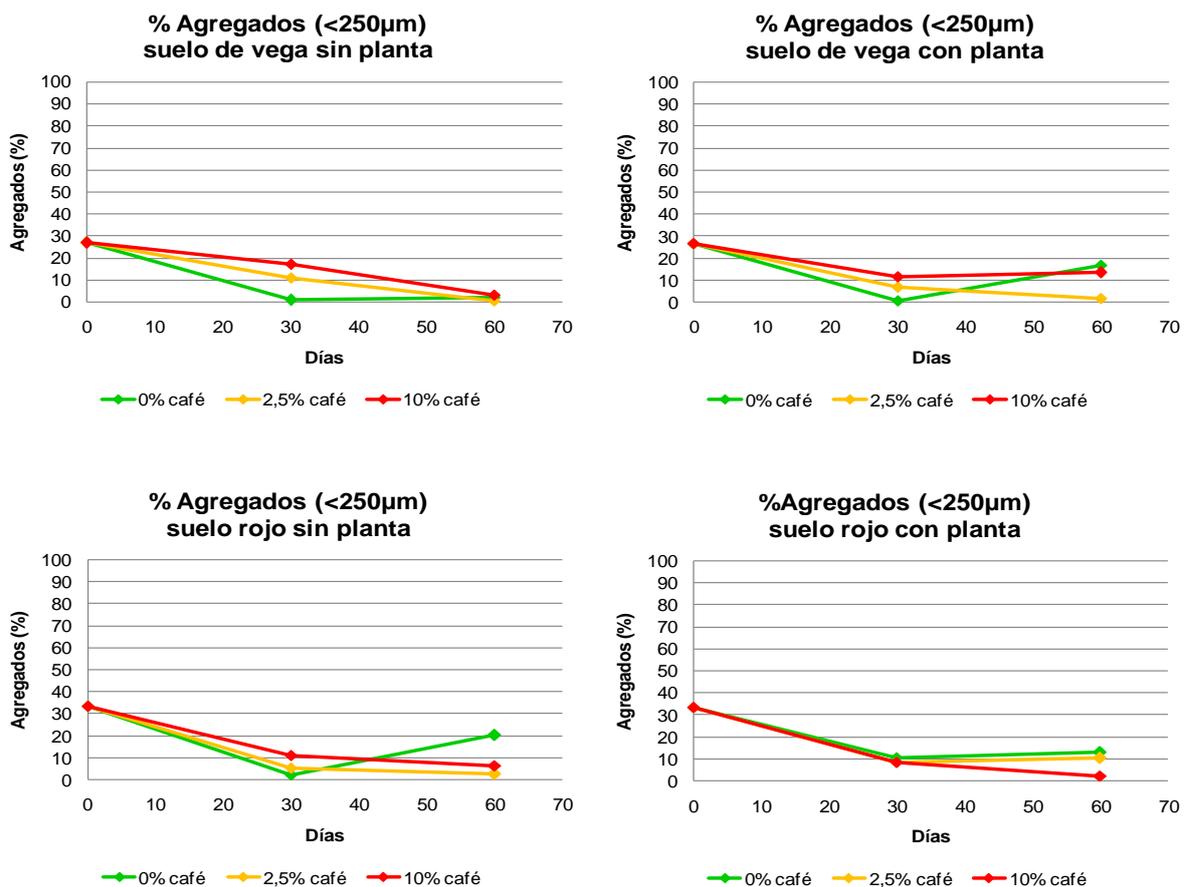
**Figura 10.** Porcentaje de agregados con un tamaño entre 250 y 1000 micrómetros en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

En suelo de vega sin planta: con respecto al valor inicial (50%), durante los primeros 30 días, cuando al suelo no se le adiciona PDC, se produce un descenso brusco. En los suelos con un 2,5% y 10% de PDC se mantiene constante el valor inicial durante los primeros 30 días. Sin embargo, transcurridos 60 días, se observa como el valor sin adición de PDC se mantiene más o menos constante cerca del 20%. Al adicionar un 2,5%, desciende considerablemente. Y el suelo con un 10% de café desciende pero quedándose el valor más alto en torno al 30% de agregados con un tamaño entre 250-1000  $\mu\text{m}$ .

En suelo de vega con planta: durante los primeros 30 días, se produce un brusco descenso en el caso de 0% de PDC quedándose con el valor más bajo (10%), en suelo con 2,5% de PDC aumenta levemente respecto al valor inicial, y en suelo con un 10% de café desciende levemente. Pero en los siguientes 30 días, el caso con 0% de PDC aumenta considerablemente aunque no alcanza el valor inicial, el suelo con 2,5% desciende quedándose por debajo del 30% y el suelo con un 10% de PDC aumenta alcanzando valores en torno al 50%.

En suelo rojo: teniendo en cuenta el valor inicial, con planta y sin planta las reacciones son muy similares. Durante los primeros 30 días, el suelo con un 0% de PDC desciende por debajo del valor inicial, el caso con un 2,5% de PDC disminuye levemente y al adicionar un 10% de café ascienden levemente. Pero transcurridos 60 días, el suelo sin adición de PDC aumenta superando el valor a 60 días de los otros dos casos (en torno al 40%). Al adicionar un 2,5% de café se produce un leve descenso y al añadir un 10% de café se produce un descenso más marcado quedándose el valor más pequeño.

- Porcentaje de agregados con un tamaño  $<250\mu\text{m}$  (Figura 11).



**Figura 11.** Porcentaje de agregados con un tamaño inferior a 250 micrómetros en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

En suelo de vega sin planta: partiendo de un mismo valor inicial, durante los primeros 30 días, el porcentaje de agregados desciende en los tres casos con 0%, 2,5% y 10% de PDC. Este descenso es mayor cuando no se adiciona café (llegando al 0%) y menor con un 10% de café quedándose cerca del 20% de agregados. Tras 60 días, los casos con un 2,5% y 10% de PDC continúan

descendiendo, ambos alcanzan valores muy bajos rozando el 0%. Y el caso sin adición se mantiene constante en 0%.

En suelo de vega con planta: cuando no se adiciona café, el porcentaje de agregados desciende hasta el 0% durante los primeros 30 días y después asciende en torno al 20% pero quedándose por debajo del valor inicial. Cuando se adiciona un 2,5% de café se produce un descenso continuo durante los 60 días alcanzando el 0%. Mientras que la muestra con un 10% de PDC, durante los primeros 30 días desciende obteniendo un valor en torno al 10% y se mantiene en esa posición transcurridos los 60 días.

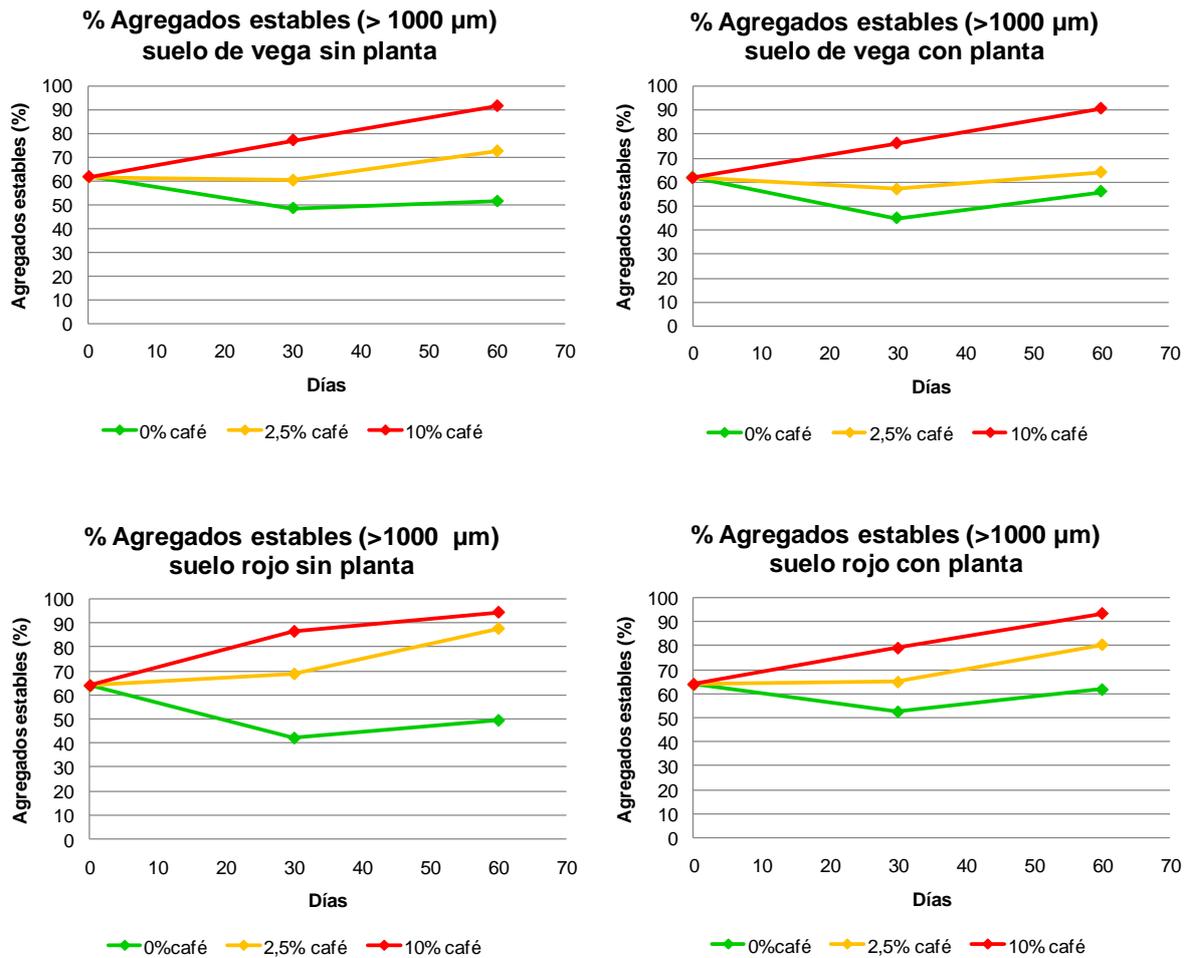
En suelo rojo sin planta: a partir del valor inicial, durante los primeros 30 días, se produce un descenso continuo del porcentaje de agregados añadiendo 0%, 2,5% y 10% de PDC. El mayor descenso se produce en la muestra sin adición de café y el menor cuando se adiciona un 10% de café. Sin embargo, en los siguientes 30 días, los suelos que contienen un 2,5% y 10% de café siguen disminuyendo mientras que el suelo sin adición incrementa alcanzando un valor del 20%.

En suelo rojo con planta: durante los primeros 30 días, las tres muestras con distintos porcentajes de café, desciende de forma continua y describiendo valores muy similares. Sin embargo, en los últimos 30 días al adicionar un 10% de café sigue descendiendo hasta rozar el 0%, mientras que las muestras sin adición y con un 2,5% se mantiene constantes en torno al 10%.

En resumen, parece que el porcentaje de agregados  $>1000\mu\text{m}$  se incrementa con el tiempo, permaneciendo casi igual el contenido de agregados de tamaño intermedio ( $250-1000\mu\text{m}$ ) y disminuyendo los agregados más pequeños ( $<250\mu\text{m}$ ). El tiempo de incubación con humedad a capacidad de campo parece mejorar, por tanto, la agregación del suelo, sin que exista un efecto apreciable de la planta. Con respecto al efecto del café, éste no parece tener influencia en el aumento de los agregados de mayor tamaño del suelo de vega, pero si es apreciable en el suelo rojo. Éste es de textura más fina, lo que facilita la acción de la materia orgánica de los posos de café como agente de agregación. Mizuta et al. (2015), concluyen en que la adición de almidón y celulosa a un suelo tropical derivado de materiales volcánicos, favorece principalmente la formación de agregados de más de  $1000\mu\text{m}$ , y por el contrario la fracción de los mesoagregados ( $250-1000\mu\text{m}$ ) decrece, con respecto al suelo control. Andruschkewitsch et al. (2014) coinciden totalmente con los autores anteriores, pero en este caso adicionando paja de trigo preincubada a Luvisoles háplicos derivados del loess. Liu et al. (2014) y Arthur et al. (2014), concluyen también que la adición de biochar a cultivos de batatas o "ground rape shoots", respectivamente, supone un aumento de los macroagregados en el suelo. Di Jiaying et al. (2014) en un experimento de largo plazo (1986-2014) encuentran estos mismos resultados adicionando al suelo bajas y altas cantidades de estiércol. Hua et al. (2014) inciden en estos mismos resultados aunque no especifican nada respecto del tamaño de dichos agregados, solo mencionan un aumento de la agregación.

#### **4.1.2 Porcentaje de agregados estables**

- Agregados estables con un tamaño  $> 1000\mu\text{m}$  (Figura 12).

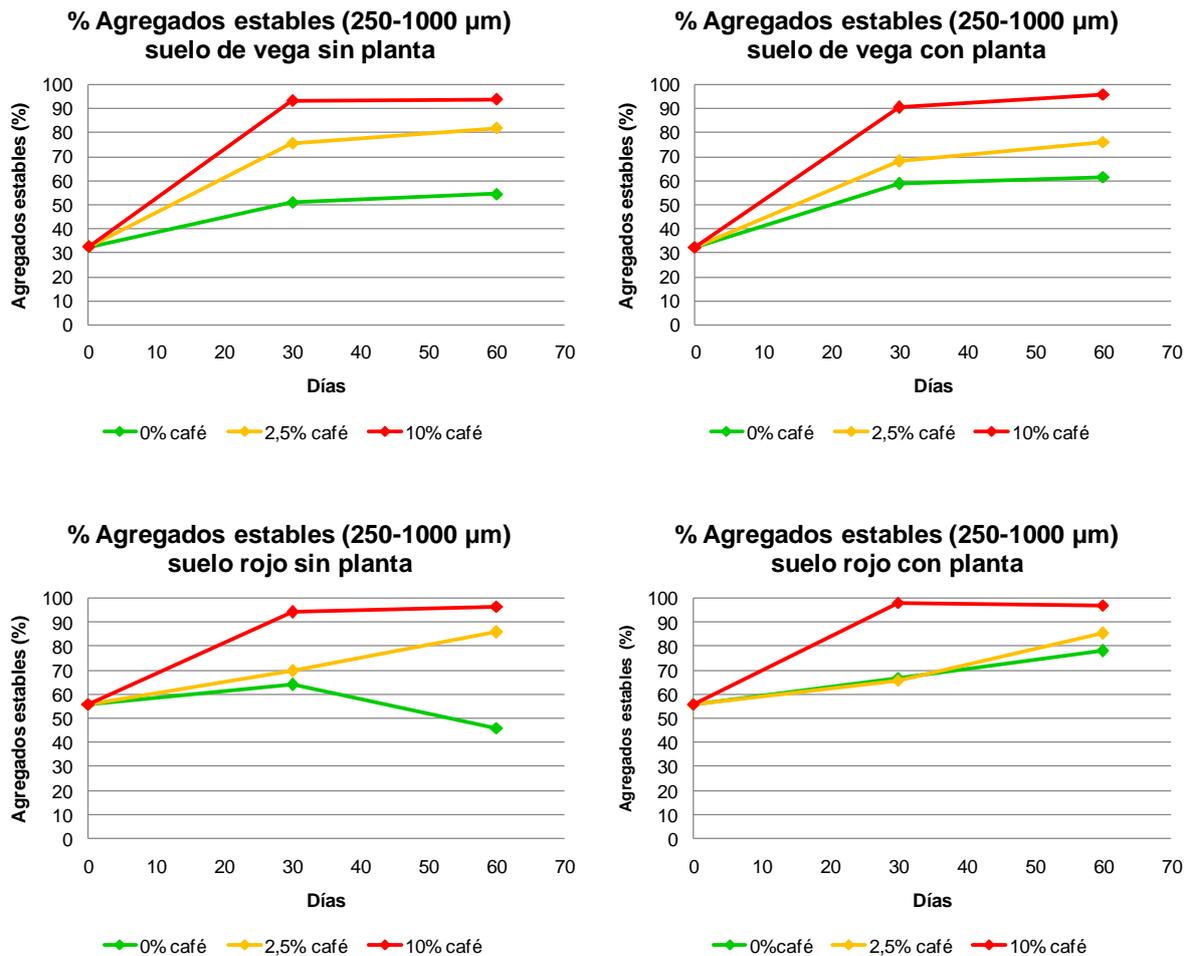


**Figura 12.** Porcentaje de agregados estables con un tamaño superior a 1000 micrómetros en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

En suelo de vega: teniendo en cuenta el mismo valor inicial (61,88%). Cuando no se adiciona café, a los 30 días, el porcentaje de agregados estables disminuye tanto con planta como sin planta. Sin embargo, a los 60 días, cuando no tiene planta se mantiene prácticamente el mismo valor (en torno al 50%) y con planta aumenta ligeramente. Al añadir un 2,5% de PDC, en ambos casos, tras pasar 30 días se mantiene en el mismo valor inicial, pero después de 60 días aumenta siendo mayor el incremento en el caso sin planta donde supera el 70% de agregados estables. Y al añadir un 10 % de PDC, en ambos casos, se produce un incremento continuo conforme aumenta el número de días superando el 90% de agregados estables.

En suelo rojo: A partir de un mismo valor inicial (63,98%). Cuando no se ha adicionado PDC, hasta los 30 días, el porcentaje de agregados estables disminuye sobre todo en el caso sin planta. Tras pasar 60 días, aumenta levemente pero sin superar el valor inicial. Al adicionar un 2,5% de café se produce un aumento de los agregados estables, ligero tras pasar 30 días y más brusco a los 60 días. Y al adicionar un 10 % de café, en ambos casos, el porcentaje de agregados estables aumenta considerablemente y de forma continua, durante los 60 días, alcanzando valores que superan el 90% de agregados estables.

- Agregados estables con un tamaño entre 250-1000 μm (Figura 13).



**Figura 13.** Porcentaje de agregados estables con un tamaño entre 250 y 1000 micrómetros en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

En el suelo de vega sin planta: partiendo de un 32,39% como valor inicial. Cuando no se añade café, el porcentaje de agregados estables aumenta a los 30 días y después sigue aumentando muy levemente hasta los 60 días alcanzando un valor superior al 50% de agregados estables. Al añadir 2,5% y 10% de café se describe la misma tendencia aunque de forma más pronunciada. La muestra con un 2,5% de café alcanza el 80% de agregados estables. Mientras que con un 10% de PDC supera el 90%.

En suelo de vega con planta: partiendo del mismo valor inicial. Durante los primeros 30 días, se produce un incremento brusco en los tres casos siendo superior al adicionar un 10% de PDC alcanzo el 90% de agregados estables. El valor menor pertenece al caso sin adición de café. Durante los siguientes 30 días, los tres casos siguen aumentando aunque de forma leve, el valor mayor sigue siendo el caso de 10% de PDC que supera el 90% de agregados estables.

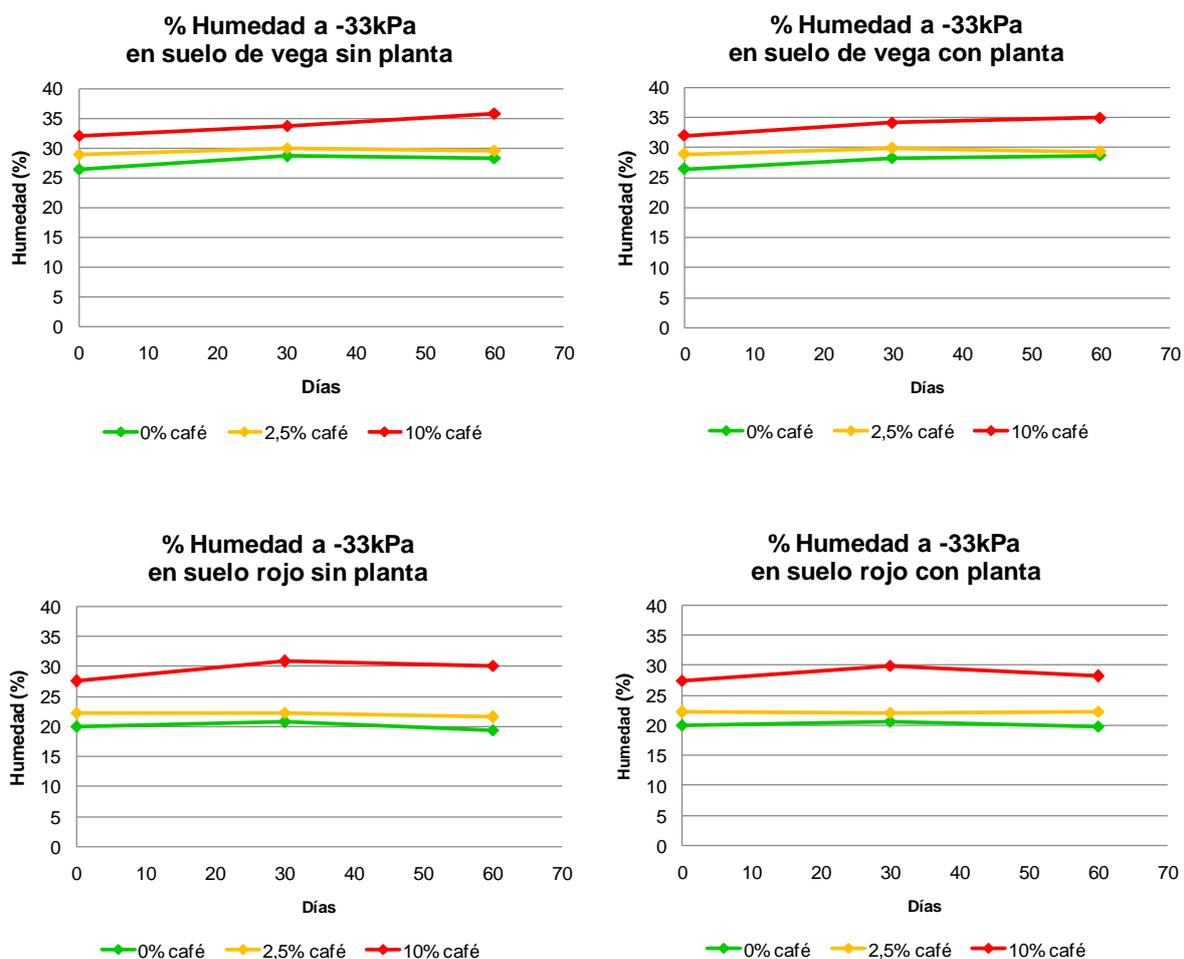
En el caso del suelo rojo sin planta: tomando como valor inicial un 55,95%. Sin adición de café, durante los primeros 30 días, el porcentaje de agregados estables presenta un leve incremento, pero tras pasar 60 días desciende considerablemente por debajo del valor inicial. Al añadir un 2,5% de café se produce un incremento continuo durante los 60 días superando el 80% de agregados estables. Y al adicionar un 10% de café incrementa bruscamente en los primeros 30 días y después se mantiene por encima del 90%.

En suelo rojo con planta: los valores sin adición y con un 2,5% de café, son muy similares, incrementan de forma continúa durante los 60 días siendo en el caso de adición de un 2,5% un poco superior (en torno al 80%). Sin embargo, al añadir un 10% de café se aprecia un brusco incremento del porcentaje de agregados estables, muy cercano al 100% durante los primeros 30 días y luego se mantiene en el tiempo hasta los 60 días.

Los resultados muestran una mejora evidente de la estabilidad estructural en todas las fracciones de tamaño de agregados. La estabilidad tiende a ser mayor cuanto más tiempo de incubación y más cantidad de café se ha adicionado. Ello es congruente con el efecto estabilizante de la materia orgánica, que aquí se ha adicionado como posos de café, y la degradación de la misma con el tiempo por la acción de microorganismos, lo que cataliza la adhesividad de las sustancias húmicas (Amézketa, 1999). Asimismo, el incremento de estabilidad es mayor en los agregados más pequeños (<250  $\mu\text{m}$ ), probablemente debido a una fábrica de partículas más pequeñas y de formas más laminares, que superpuestas entre sí favorecen una organización más estable (Sánchez-Marañón et al., 2011). De nuevo, la existencia o no de planta tampoco tuvo efecto sobre la estabilidad de los agregados. El aumento de la estabilidad estructural con la adición de enmiendas orgánicas está ampliamente descrito en la bibliografía. Podemos citar como trabajos más actuales los de Zornoza et al. (2015) con la adición de estiércoles de cerdo; Baiamonte et al. (2015), Zhang et al. (2015), Khademalrasoul et al. (2014) todos ellos con adición de biochar, Wang et al. (2014) con la adición de restos de maíz, restos de maíz compostado y estiércol de ganado. Abdollahi et al. (2014) con la adición de estiércoles a suelos y el estudio a largo plazo de los resultados (13-14 años) concluyen que la materia orgánica aumenta la estabilidad de la estructura, y que son en concreto los polisacáridos generados por los microorganismos los que más contribuyen a esa estabilización. Este resultado coincide además con nuestras observaciones con microscopía electrónica de barrido como más adelante comentaremos en este mismo capítulo de la memoria.

#### 4.1.3 Retención de agua

- Porcentaje de humedad a -33kPa (Figura 14).



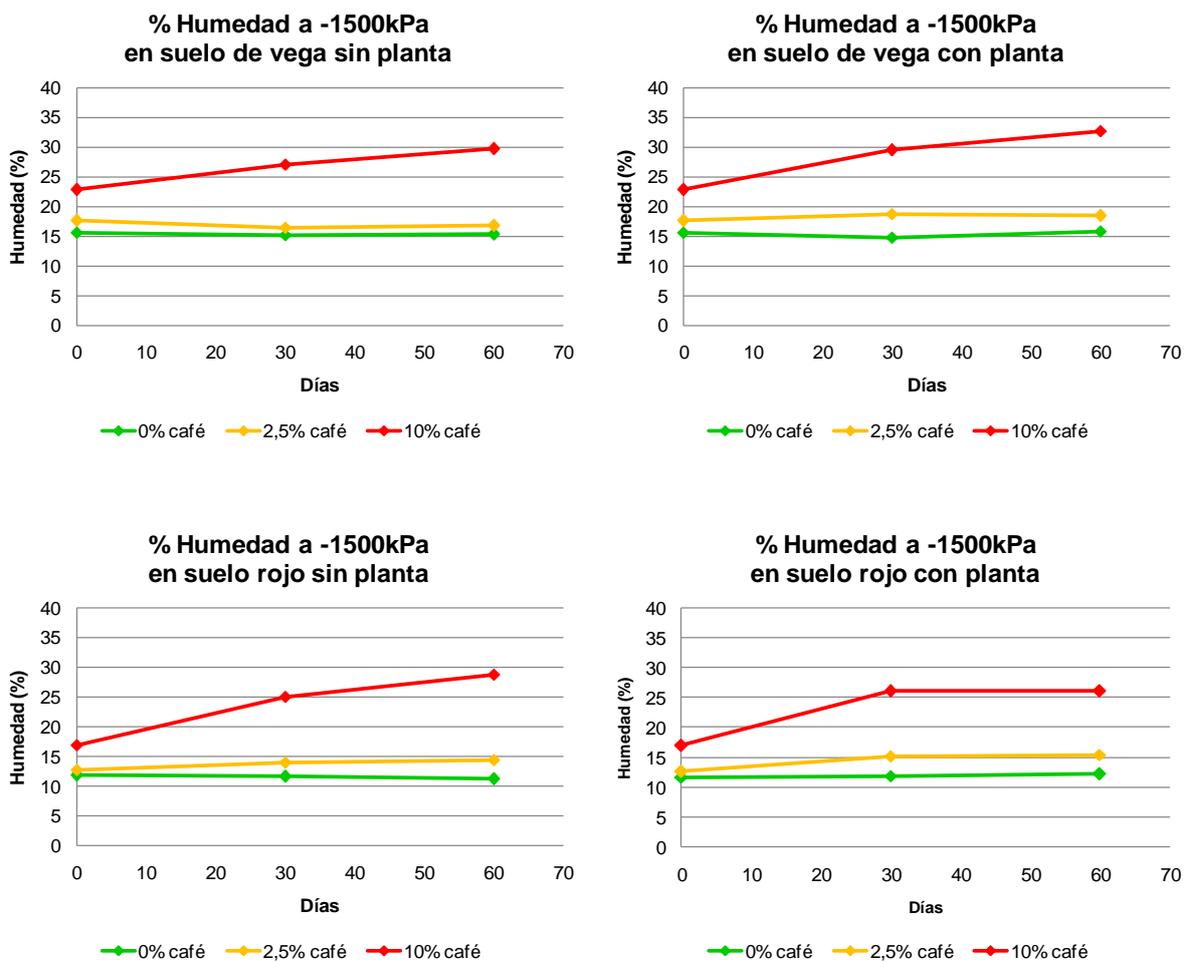
**Figura 14.** Porcentaje de humedad retenida a una presión de -33kPa en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

Considerando que cada tipo de suelo con distinto contenido en PDC parte de un valor inicial distinto.

El suelo de vega: tanto con planta como sin planta, presenta valores muy similares. En los primeros 30 días sin planta, el suelo sin adición de café asciende de 26% a 28%. Cuando se adiciona un 2,5% de café asciende muy levemente de 28% a 29%, mientras que el caso de adición de un 10% de café incrementa desde un 32% a un 35%. Transcurridos 30 días más, los casos de no adición y de un 2,5% de café se mantiene constantes en su valor anterior, mientras que el caso de un 10% de adición asciende de forma leve pero continua hasta superar el 35%. En el caso del suelo de vega con planta los valores son muy similares.

En suelo rojo ocurre lo mismo, los valores sin planta y con planta son muy similares. A los 30 primeros días en los casos con un 0% y un 2,5% de PDC se mantiene constante el valor inicial siendo superior el valor del caso con un 2,5% de adición de café. Mientras que cuando se adiciona un 10% de PDC, inicialmente el porcentaje de humedad es mayor que el resto y además incrementa hasta superar el 30%. A los 60 días, las muestras con 0 y un 2,5% de café siguen manteniéndose constantes en su valor inicial correspondiente. Sin embargo, cuando se adiciona un 10% de café en el caso sin planta se mantiene constante el valor a los 30 días pero con planta desciende volviendo a su valor inicial.

- Porcentaje de humedad a -1500kPa (Figura 15).



**Figura 15.** Porcentaje de humedad retenida a una presión de -1500 kPa en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

Considerando que cada tipo de suelo con distinto contenido en PDC parte de un valor inicial distinto.

En suelo de vega sin planta: cuando no se adiciona café, durante los 60 días permanece constante en su valor inicial correspondiente a 15,6%. En el caso de un 2,5% de adición de PDC disminuye levemente en torno a su valor inicial de 17,6% durante los 60 días. Sin embargo, al adicionar un 10% de PDC se produce un incremento continuo durante los 60 días, partiendo de un 22,8% de humedad retenida y alcanzando un valor en torno al 30%.

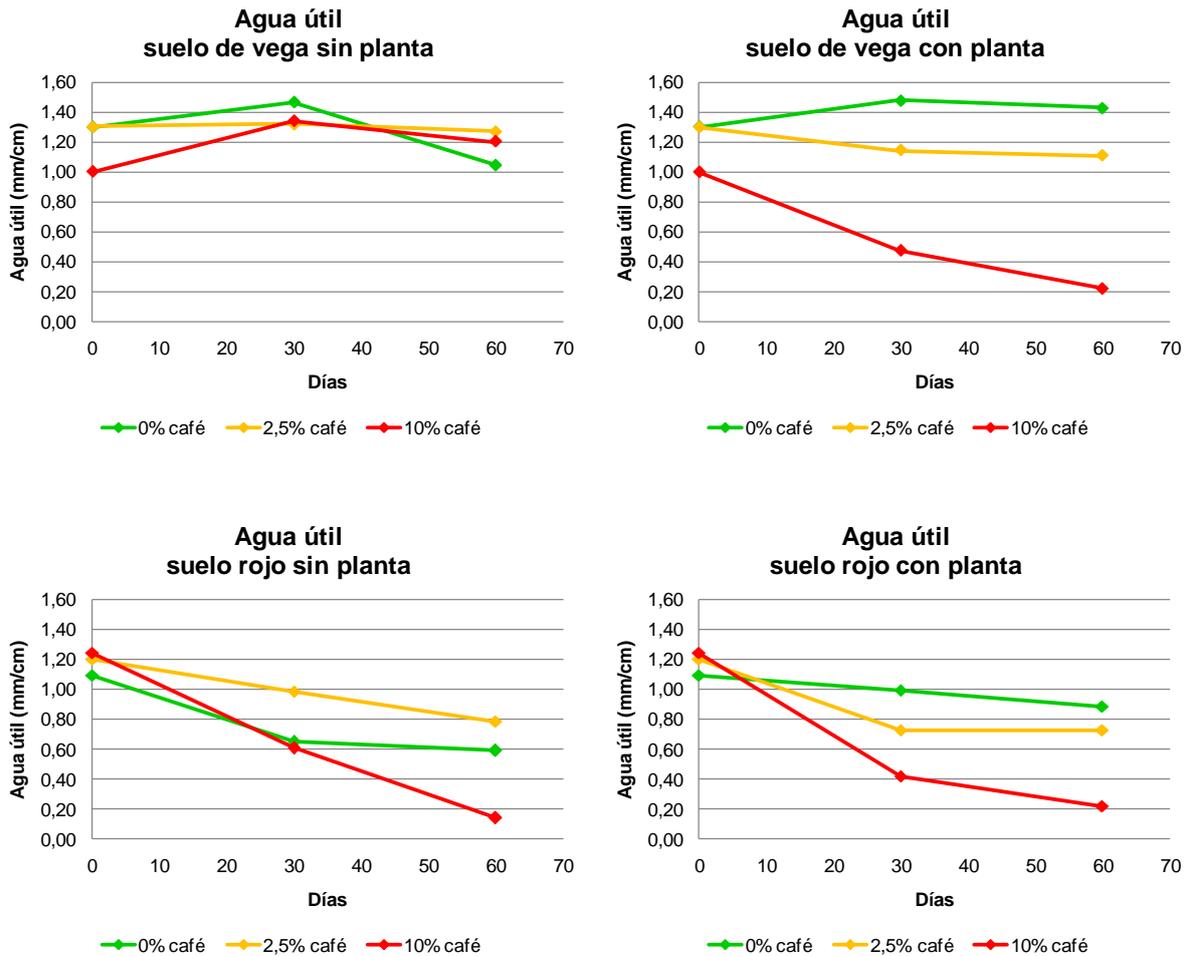
En suelo de vega con planta: cuando no se adiciona café, se mantiene en su valor inicial durante los 60 días. En el caso de un 2,5% de adición de PDC incrementa levemente no llegando al 20% de humedad retenida. Y cuando se adiciona un 10% de PDC se produce un incremento constante, durante los 60 días, superando notablemente el 30%.

En suelo rojo: tanto con planta como sin planta, cuando no se adiciona café se mantiene más o menos constante el valor inicial que corresponde a un 11,7%. En el caso de un 2,5% de adición de PDC, se observa un leve incremento durante los 60 días pasando de un 12,6% a estar alrededor del 15%. Mientras que cuando se adiciona un 10% de PDC se produce un incremento considerable durante los primeros 30 días. El valor inicial es de 17%, en caso sin planta asciende a un 25% y con planta a un 26%. En los siguientes 30 días para el caso con planta se mantiene constante el valor a 30 días, y para el caso sin planta sigue aumentando hasta alcanzar el 29%.

Como corresponde al efecto positivo de la materia orgánica sobre la retención de agua (Campbell et al., 2013), la humedad a -33 kPa y -1500 kPa se incrementó conforme se adicionó más cantidad de café al suelo. Ahora bien, el paralelismo que exhiben las líneas de % de humedad a -33 kPa en la Figura 14, sugieren una escasa intervención del tiempo de incubación que, sin embargo, sí es patente a -1500 kPa. Para este último potencial, la humedad del suelo con 10% de café creció de forma más acusada y además lo hizo especialmente en los tiempos de incubación más largos. Según Kasongo et al. (2011) la adición de café también incrementa la retención de agua, pero la técnica empleada no es comparable con la que se utiliza en este trabajo. Hansen et al. (2015) también describen un incremento de las retenciones de agua en suelo cuando se adiciona biochar.

#### **4.1.4 Agua útil**

- Cantidad de agua utilizable por las plantas (Figura 16).



**Figura 16.** Agua útil (cm/mm) en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

En suelo de vega sin planta: partiendo de un mismo valor inicial para los tres casos, se produce un descenso durante los primeros 30 días sobre todo cuando se añade posos de café. Pero transcurridos 60 días se ve como sufre un descenso brusco el caso sin adición de café quedando por debajo de las dos muestras con 2,5 y 10% de PDC.

En suelo de vega con planta: durante los primeros 30 días el caso si adición de café se mantiene en el valor más alto, mientras que al adicionar un 2,5% de PDC se produce un descenso considerable, pero mucho mayor aún es el descenso generado al adicionar un 10% de posos de café quedando cerca de 0,4 mm/cm. En los siguientes 30 días, la muestra si adición de café sigue manteniéndose en el valor más alto ya que apenas desciende, mientras que el caso de un 2,5% de café se mantiene en el mismo valor que a 30 días, y cuando se adiciona un 10% de café sigue descendiendo rondando valores de un 0,2 mm/cm.

En suelo rojo sin planta: durante los 30 primeros días, se produce un considerable descenso del agua útil en los casos sin adición de café y cuando se añade un 10%. Sin embargo, la muestra con un 2.5% de posos de café se mantiene cerca del nivel inicial. Transcurridos 60 días, todos los casos continúan descendiendo haciéndolo en mayor medida la muestra con un 10% de PDC y quedándose el valor más alto el caso de un 2.5% de café.

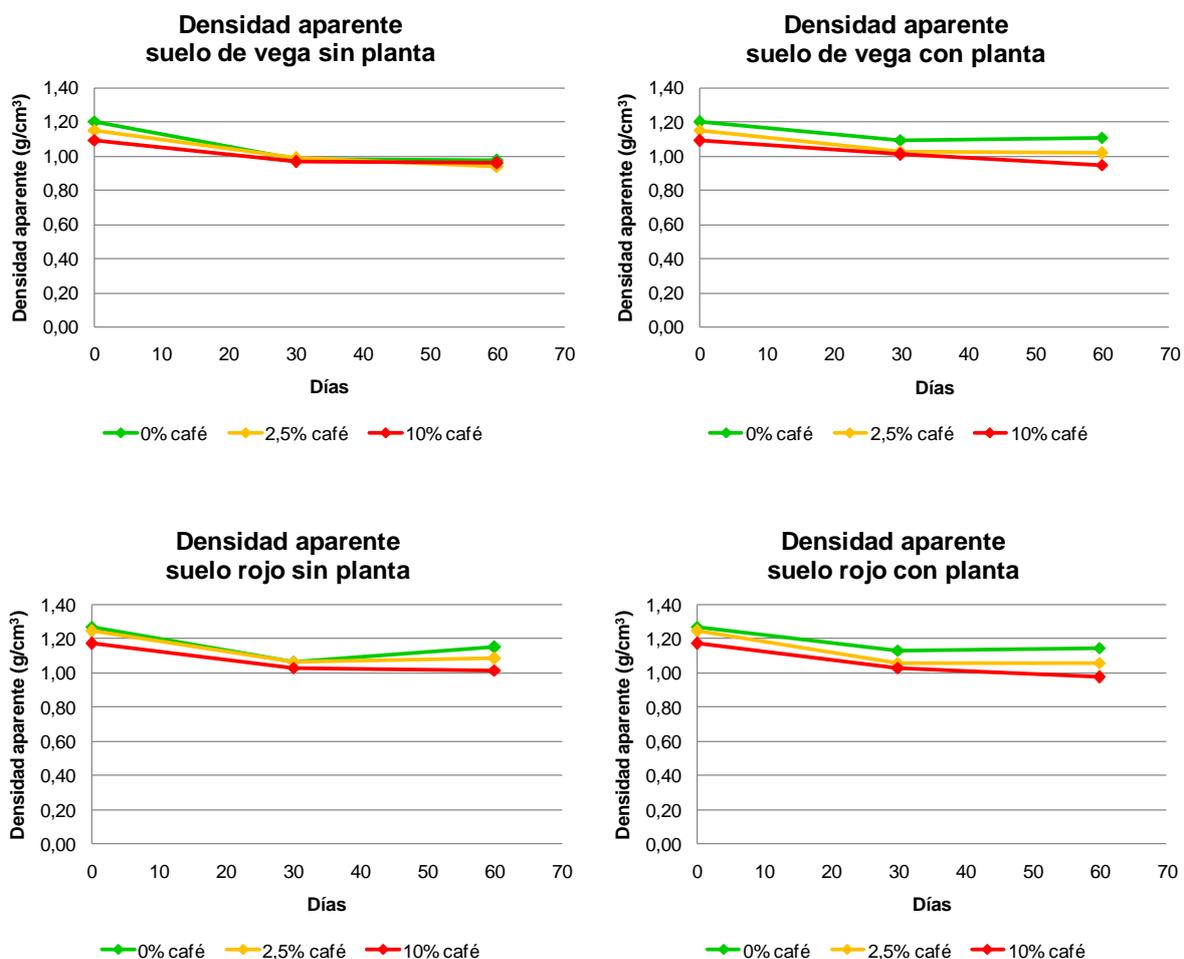
En suelo rojo con planta: inicialmente se produce un descenso en los tres casos, más pronunciado cuando se adiciona un 10% de posos de café y menor en el caso de la muestra sin adición. Transcurridos 60 días, este descenso a continuado, quedándose el valor más bajo en caso con un 10% de posos de café en torno a un valor de 0,2 mm/cm.

El agua útil del suelo se reduce con la adición de café, especialmente en el suelo que tuvo planta. Ello es consecuencia de que la retención de agua se incrementa en mayor medida a -1500 kPa que a -33 kPa. La pérdida de agua útil es un efecto desfavorable y un resultado no esperable en este ensayo. El

incremento más acusado de la retención de agua a -1500 kPa parecería indicar que los poros de almacenamiento (50-0.2  $\mu\text{m}$ ) se estuvieran reduciendo a favor de un incremento de la porosidad residual (<0.2  $\mu\text{m}$ ). Al menos, parece que los poros de almacenamiento estarían reduciendo su tamaño, lo que repercute en una mayor retención de agua. Como ocurre especialmente en las muestras que tuvieron planta, quizás haya habido productos segregados por la misma que junto a las partículas de café van taponando los poros.

#### 4.1.5 Densidad aparente

- Densidad aparente de los suelos según sus características (Figura 17).



**Figura 17.** Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) en función de las diferentes dosis de PDC y de los días transcurridos así como del tipo de suelo y de si contiene o no planta.

En suelo de vega sin planta: el caso sin adición de café parte de 1,2 como valor inicial. El caso con un 2,5% de adición de PDC parte de un 1,15 como valor inicial, y para un 10% de café el valor inicial corresponde a 1,09. A partir de estos valores, durante los 30 primeros días, los 3 casos descienden su densidad aparente hasta alcanzar un valor en torno al 0,98%. Y a partir de ahí hasta los 60 días, el caso con un 0% de PDC se mantiene constante mientras que con un 2,5 y 10% de café descienden muy levemente unas cuantas centésimas.

En suelo de vega con planta: los valores iniciales son los mismos que los anteriores. Durante los primeros 30 días los tres casos descienden su densidad aparente quedándose el caso con 0% de café con el valor más alto (1,11  $\text{g}/\text{ml}$ ). En los siguientes 30 días, el caso de un 0% de café se mantiene constante al igual que el caso que con un 2,5% de PDC. Mientras que cuando se adiciona

un 10% de café la densidad aparente sigue disminuyendo obteniendo el valor más pequeño de 0,95 g/cm<sup>3</sup>.

En suelo rojo sin planta: los valores iniciales para las muestras con 0%, 2,5% y 10% de PDC, son 1,27, 1,24 y 1,17 (g/cm<sup>3</sup>) correspondientemente. Durante los primeros 30 días se produce un descenso de la densidad aparente en los tres casos obteniéndose valores muy cercanos al 1. En los siguientes 30 días, el caso con un 0% de café incrementa aunque queda por debajo de su valor inicial, la muestra con un 2,5% de café se mantiene constante y cuando se adiciona un 10% de café desciende muy levemente.

En suelo rojo con planta: los valores iniciales son los mencionados anteriormente. Durante los primeros 30 días en los tres casos se produce un descenso de la densidad aparente quedándose con el valor más alto la muestra sin adición de café con 1,13 g/cm<sup>3</sup>. En los siguientes 30 días, cuando no se adiciona café crece muy levemente, tan solo 0,01. Mientras que el caso con un 2,5% de PDC se mantiene constante y cuando se adiciona un 10% de PDC se produce un leve descenso quedando por debajo de 1 g/cm<sup>3</sup>.

El comportamiento de la densidad aparente indica que con la adición progresiva de café y con el tiempo podría estar aumentando la porosidad total del suelo. Esto ocurre especialmente en el suelo rojo y en las muestras con planta. No obstante, también es cierto que, al menos en parte, la disminución de la densidad aparente podría deberse a la presencia de cantidades cada vez mayores de café, con menor densidad que las partículas minerales del suelo. Este mismo resultado ha sido descrito por Li et al. (2014) con la adición de restos de cosecha a Mollisoles, concluyendo que el manejo ecológico del suelo puede mejorar sus condiciones físicas. No se sabe en este momento la contribución que cada uno de estos factores, aumento de porosidad y densidad del café, tiene a los cambios de densidad aparente observados en el suelo. No obstante, sí se observa que el comportamiento de la densidad aparente es justamente contrario al del agua útil. Ello podría significar, como primera posibilidad, que a pesar de que la porosidad total podría haberse incrementado (menor densidad aparente), se están taponando los poros de almacenamiento de agua útil y produciendo en mayor medida poros residuales. Otra posibilidad es que la bajada de densidad aparente se deba a la presencia de las partículas de café con menos densidad, pero su disposición en la superficie de los agregados está dificultando el acceso del agua a los poros de almacenamiento internos de los agregados de suelo. Este es un asunto todavía no resuelto que requiere de más investigación, especialmente sobre porosidad (tamaño y distribución) de los agregados de suelo con café.

## 4.2 Análisis estadístico de las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo

### 4.2.1 Estadística descriptiva

En principio vamos a mostrar un resumen estadístico (Tabla 3) de todas las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas tenidas en cuenta en este ensayo.

**Tabla 3.** Resumen estadístico de propiedades químicas, físicas y físico-químicas (n = 26).

	pH	CE (dS/m)	C.O. (%)	N (%)	C/N	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (%)
<b>Recuento</b>	26	26	26	26	26	26
<b>Promedio</b>	7,73462	0,573077	2,80731	0,183885	14,8846	20,0885
<b>Desviación Estándar</b>	0,584426	0,302731	1,63683	0,0866165	3,26591	19,1994
<b>Coefficiente de Variación</b>	7,55598%	52,8256%	58,3062%	47,1037%	21,9415%	95,5744%
<b>Mínimo</b>	6,7	0,2	0,99	0,089	10,0	0,4

<b>Máximo</b>	8,5	1,3	6,11	0,356	20,0	41,1
<b>Rango</b>	1,8	1,1	5,12	0,267	10,0	40,7
<b>Sesgo Estandarizado</b>	-0,738772	1,1463	1,74869	1,22591	-0,157073	0,0181896
<b>Curtosis Estandarizada</b>	-1,15276	-0,376607	-0,691787	-1,26457	-1,22814	<b>-2,23267</b>
	<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Humedad (%) -33kPa</b>	<b>Humedad (%) -1500kPa</b>	<b>Agua útil (mm/cm)</b>	<b>Agregados estables (%) 1000-250 µm</b>	<b>Agregados estables (%) &gt;1000 µm</b>
<b>Recuento</b>	26	26	26	26	26	26
<b>Promedio</b>	1,04731	27,1519	18,7453	0,910769	74,4312	68,4265
<b>Desviación Estándar</b>	0,0781055	5,09544	6,73745	0,413056	18,2112	16,0442
<b>Coefficiente de Variación</b>	7,45774%	18,7664%	35,9421%	45,3524%	24,4672%	23,4473%
<b>Mínimo</b>	0,93	19,34	11,097	0,14	32,39	42,31
<b>Máximo</b>	1,24	35,736	32,677	1,48	97,95	94,44
<b>Rango</b>	0,31	16,396	21,58	1,34	65,56	52,13
<b>Sesgo Estandarizado</b>	1,31903	-0,303173	1,58945	-0,689383	-0,88587	0,337787
<b>Curtosis Estandarizada</b>	-0,0526251	-1,19799	-0,922567	-0,988851	-0,649383	-1,20868

La Tabla 3 muestra un resumen estadístico de los resultados de los parámetros físicos analizados en las 26 muestras de suelo. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad y de forma. La densidad aparente y el agua útil, respectivamente, es la propiedad con menor y mayor variabilidad (7% y 45% de coeficiente de variación). De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Como los valores de estos estadísticos están en el rango de -2 a +2, se considera que no hay desviaciones significativas de la normalidad, lo cual valida los procedimientos estadísticos que más tarde se aplican a estos datos.

Del mismo modo, también se han obtenido las medidas estadísticas descriptivas de variables químicas y fisicoquímicas, que como ya se ha indicado previamente, se incluyeron en este análisis estadístico al objeto de interpretar y comprender mejor el comportamiento de las propiedades físicas del suelo tras la adición de café. Al igual que las propiedades físicas, los estadísticos de las variables químicas y fisicoquímicas se ajustan bastante bien a la normalidad, con la excepción de la variable contenido de carbonatos, cuyo valor de curtosis estandarizada está ligeramente fuera del rango deseable. El signo negativo indica un cierto achatamiento de la curva de normalidad para esta variable. Esta variable también tiene una extrema variabilidad (95%) dado que recoge datos de un suelo carbonatado (V) y otro no carbonatado (R). En general, se observa una mayor variabilidad de los datos químicos y fisicoquímicos que de aquellos correspondientes a las variables físicas. La razón de ello estriba no sólo en los datos de partida (suelos diferentes), sino también en la progresiva adición de posos de café que modifica los contenidos de carbono orgánico y nitrógeno, la relación

C/N, y los valores de pH y conductividad eléctrica. Todo indica que la química del suelo se afecta en mayor medida que la física del suelo cuando hay adiciones de posos de café.

#### 4.2.2 Análisis de varianza (ANOVA)

Las propiedades físicas del suelo determinadas en este TFG se han sometido a un análisis de varianza respecto a las condiciones experimentales del ensayo realizado. La prueba-F determina si hay diferencias significativas entre las medias de varios niveles de una variable según un posible factor de variación. La tabla ANOVA (Tabla 5) descompone la varianza de una variable en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. El valor de F es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Si el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa (95,0% de confianza) entre la media de la variable para los diferentes niveles considerados de un factor. Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras se utiliza la prueba de Múltiples Rangos. El método empleado para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. Para comprobar si hay homocedasticidad (homogeneidad de varianzas) se utilizó el test de Levene.

**Tabla 5.** Análisis de varianza para propiedades físicas con valores significativamente diferentes (< 0.05) según los factores experimentales suelo: V (n = 13), R (n =13); días de tratamiento: 0 (n = 2), 30 (n = 12), 60 (n = 12); y porcentaje de café adicionado: 0 (n = 10), 2.5 (n = 8), 10 (n = 8).

Factor	Variable de respuesta	F	P	Homocedasticidad	Contraste de niveles
Suelo	Densidad aparente	5.35	0.0296	L = 0.0362, P = 0.8506	V=1.01a, R=1.08b
Suelo	Humedad -33 kPa	23.06	0.0001	L = 0.9421, P = 0.3414	V=30.65a, R=23.65b
Suelo	Agua útil	12.86	0.0015	L = 0.1429, P = 0.7086	V=1.15a, R=0.67b
Días	Densidad aparente	7.03	0.0041	L = 1.9145, P = 0.1701	0=1.21a, 30= 1.03b, 60= 1.03b
Días	Agregados estables 250-1000	3.96	0.0334	L = 0.0200, P = 0.9802	0= 44.2a, 30= 74.6b, 60= 79.4b
Café	Densidad aparente	8.38	0.0018	L = 1.5299, P = 0.2377	0= 1.11a, 2.5= 1.03b, 10= 0.99b
Café	Humedad -33 kPa	10.39	0.0006	L = 15.798, P = 0.0000	0= 24,1a, 2.5= 25.8a, 10= 32.2b
Café	Humedad -1500 kPa	118.2	0.0000	L = 0.9998, P = 0.3833	0= 13.4a, 2.5= 16,1b, 10= 28.0c
Café	Agua útil	5.35	0.0123	L = 0.6226, P = 0.5453	0= 1.10a, 2.5= 1.01a, 10= 0.57b
Café	Agregados estables > 1000	33.66	0.0000	L = 0.3185, P = 0.7304	0= 53.3a, 2.5= 69.6b, 10= 86.1c
Café	Agregados estables 250-1000	40.30	0.0000	L = 3.4658, P = 0.0483	0= 56.8a, 2.5= 75.9b, 10= 94.8c

El análisis de varianza simple (Tabla 5) no mostró ninguna variable con diferencias significativas entre el experimento con planta y sin planta. Ello pone de manifiesto que el factor planta, por sí solo, no tiene influencia como fuente de variación de las propiedades físicas estudiadas. El resto de factores si influyeron en los valores de algunas variables.

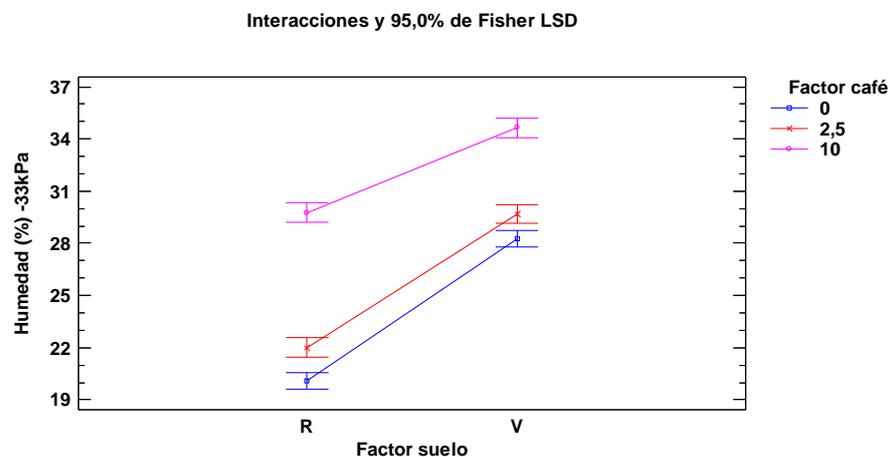
El tipo de suelo tuvo influencia en la densidad aparente, porcentaje de humedad a -33 kPa y contenido de agua útil. El suelo V muestra los valores más favorables de estas tres propiedades físicas.

El factor Días sólo afectó a la densidad aparente y a la cantidad de agregados estables más pequeños (0,25-1 mm); la primera variable disminuyó y la segunda aumentó desde 0 a 30 días, permaneciendo sin cambios a los 60 días. Se demuestra estadísticamente que la humectación a capacidad de campo y su mantenimiento en el tiempo hace disminuir la densidad aparente y favorece la estabilidad.

Por último, el factor café fue el más influyente, afectando a todas las variables físicas estudiadas. Cada adición de café aumentó significativamente los agregados estables, con especial incidencia en la estabilización de los más pequeños. La retención de agua también aumentó. El efecto es más destacado sobre la cantidad de agua retenida a -1500kPa. La densidad aparente se reduce, aunque ligeramente. Todas estas modificaciones se consideran favorables para la fertilidad física del suelo. Sin embargo, se comprueba estadísticamente que el agua útil del suelo prácticamente se redujo a la mitad cuando se adicionó un 10% de café (en promedio disminuyó desde 1,10 mm/cm a 0,57 mm/cm, (Tabla 5). Dado que el agua retenida a -33 kPa aumentó un 33,6% desde la muestra natural (0% de café) a la muestra con 10% de café, mientras que el agua retenida a -1500 kPa se incrementó hasta un 108,9%, podría estar ocurriendo una disminución del volumen de poros de almacenamiento de agua en beneficio de la porosidad residual, lo que explicaría una menor disponibilidad del agua del suelo. Los resultados estadísticos indican por tanto que, aunque el café está estabilizando los agregados y retiene más agua, ésta es menos disponible.

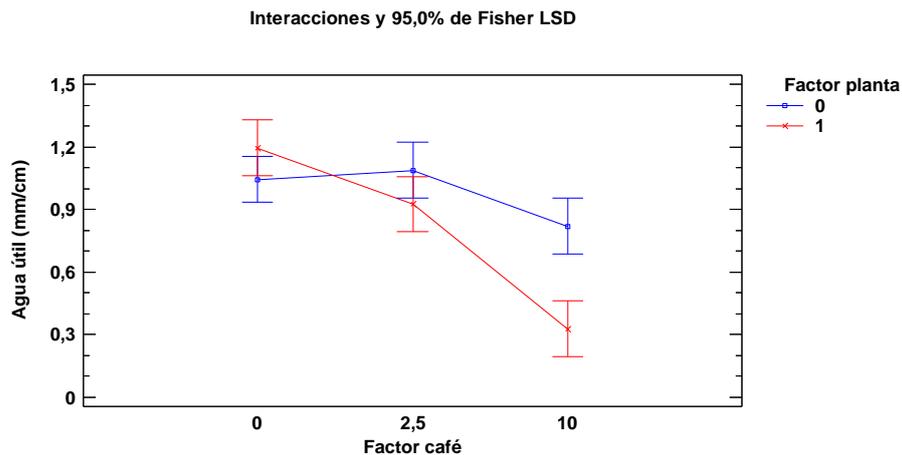
El análisis de varianza multifactorial apenas encontró interacciones entre los factores de variación testeados. En el caso de los factores días-café y días-planta, ellos fueron combinación lineal de los factores simples, lo que no permite examinar las interacciones. Para el resto, únicamente se encontró un efecto significativo para la interacción suelo-café sobre la humedad a -33kPa (Figura 18)

( $F= 13.52$   $P= 0.0004$ ) y las interacciones café-planta (Figura 19) ( $F= 7.33$   $P= 0.0066$ ), suelo-planta (Figura 20) ( $F= 4.23$ ,  $P=0.045$ ) y suelo-café-planta ( $F= 3.98$   $P= 0.045$ ) sobre la variable agua útil, los dos últimos al borde del nivel de significación ( $P = 0.05$ ).



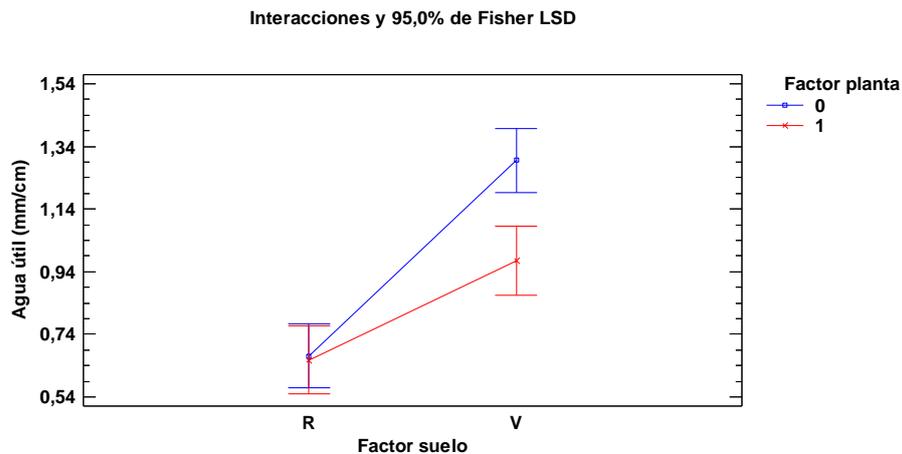
**Figura 18.** Análisis multifactorial suelo-café sobre la humedad -33kPa. Suelo de vega (V), suelo rojo (R), 0% PDC (0), 2.5% de PDC (2.5) y 10% de PDC (10).

Como podemos observar en la Figura 18, hay diferencias de retención de humedad a -33 kPa entre los tipos de suelos R y V, pero también dentro de cada tipo de suelo, con un aumento significativo y progresivo desde 0% a 2,5% y a 10% de café. Aparentemente, la humedad a -33 kPa es mayor en el suelo de vega como consecuencia de las características iniciales de cada tipo de suelo. Sin embargo, el efecto del café al 10% es significativamente más patente en el suelo rojo (R) que en el suelo de vega (V). Ello indica que el efecto del café al 10% sobre la retención de agua varía según el tipo de suelo. En el suelo rojo la diferencia de humedad a -33 kPa entre 2,5% y 10% de café es mayor que en el caso de suelo de vega.



**Figura 19.** Análisis multifactorial café-planta sobre el agua útil. Suelo sin planta (0), suelo con planta (1), 0% PDC (0), 2.5% de PDC (2.5) y 10% de PDC (10).

También son claras las diferencias en el agua útil según la cantidad de café adicionada, pero dentro de las muestras con 10% de café, aquellas con planta (nivel 1 del factor planta) tienen aún menos agua útil (Figura 19). El efecto de la planta, únicamente es patente en el nivel 10% de café. No tenemos aún una explicación a este comportamiento estadístico.



**Figura 20.** Análisis multifactorial suelo-planta sobre agua útil. Suelo sin planta (0), suelo con planta (1), Suelo de vega (V), suelo rojo (R).

Finalmente, una interacción más evidente es el efecto de la planta en el suelo V, donde causa una disminución sensible del agua útil como podemos observar en la Figura 20. En el suelo rojo (R) la existencia o no de la planta no modifica el agua útil, pero en el suelo de vega (V), las muestras con planta tuvieron menor cantidad de agua útil. Tampoco podemos aducir por el momento una explicación de este resultado estadístico.

#### 4.2.3 Análisis de correlación

**Tabla 4.** Correlaciones estadísticas significativas ( $P < 0,05$ ) entre las variables estudiadas. Densidad aparente (DA), humedad en porcentaje a -33kPa (H1), humedad en porcentaje a -1500kPa (H2), agua útil en mm/cm (AU), porcentaje de agregados estables con un tamaño superior a 1000  $\mu\text{m}$  (AE1), porcentaje de agregados estables con un tamaño entre 1000 y 250  $\mu\text{m}$  (AE2), pH (pH), conductividad eléctrica en dS/m (CE), porcentaje de

carbono orgánico (C.O.), porcentaje de nitrógeno (N), relación carbono-nitrógeno (C/N) y porcentaje de CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>). Los coeficientes más significativos se destacan en negrita (P < 0,001) y en cursiva (P < 0,01).

	DA	H1	H2	AU	AE1	AE2	pH	CE	C.O.	N	C/N	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
DA		<b>-0,726</b> <b>0,000</b>	<b>-0,647</b> <b>0,000</b>		-0,420 0,033	-0,593 0,001			-0,623 0,001	-0,561 0,003	-0,541 0,004	-0,409 0,038
H1			<b>0,836</b> <b>0,000</b>		0,433 0,027	0,478 0,013		0,466 0,016	<b>0,762</b> <b>0,000</b>	<b>0,703</b> <b>0,000</b>	0,548 0,004	<b>0,674</b> <b>0,000</b>
H2				-0,454 0,020	<b>0,757</b> <b>0,000</b>	<b>0,763</b> <b>0,000</b>			<b>0,942</b> <b>0,000</b>	<b>0,911</b> <b>0,000</b>	0,525 0,006	
AU					-0,554 0,003	-0,557 0,003	<b>0,728</b> <b>0,000</b>		-0,391 0,048	-0,487 0,011		0,607 0,001
AE1						<b>0,824</b> <b>0,000</b>	-0,453 0,020		<b>0,777</b> <b>0,000</b>	<b>0,743</b> <b>0,000</b>	0,472 0,015	
AE2									<b>0,789</b> <b>0,000</b>	<b>0,801</b> <b>0,000</b>	0,412 0,036	
pH								0,577 0,002				<b>0,900</b> <b>0,000</b>
CE												<b>0,731</b> <b>0,000</b>
C.O.										<b>0,892</b> <b>0,000</b>	<b>0,650</b> <b>0,000</b>	
N												
C/N												
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>												

El análisis de correlación (Tabla 4), donde se han incluido variables físicas y químicas, indica que hay bastantes tendencias estadísticas significativas en el comportamiento de las variables estudiadas en las muestras de suelo. Entre los parámetros físicos medidos, los mayores índices de correlación aparecen entre las variables Humedad (%) -33kPa y Humedad (%) -1500kPa ( $r = 0.84$ ) y entre los Agregados estables (%) 250-1000 y Agregados estables (%) >1000 ( $r = 0.82$ ), lo que significa que el aumento o disminución del agua retenida ocurre de modo paralelo para ambos potenciales y, de modo similar, cambios en la estabilidad de los agregados son parejos para los dos tamaños de agregados analizados. También hubo varias correlaciones positivas entre humedad y agregados estables ( $r = 0,43$  a  $0,76$ ), señalando que la mejora de la estabilidad de los agregados posibilita más retención de agua. Probablemente el propio material orgánico de los posos de café retiene más agua y, quizás también, se aumenta la porosidad de un tamaño que favorece el almacenamiento de agua. Esta última idea se ratifica con las correlaciones inversas del agua retenida a diferentes potenciales y la estabilidad de los agregados con la densidad aparente ( $r$  desde  $-0,42$  a  $-0,72$ ). Al disminuir la densidad aparente y, en consecuencia, aumentar la porosidad del suelo, ello se traduce en un aumento de estabilidad y agua retenida.

Las correlaciones entre propiedades físicas y químicas sugieren que la disminución de densidad y aumento tanto de humedad (especialmente retenida a  $-1500$  kPa) como de estabilidad de agregados se debe al incremento del C orgánico (C.O. con DA  $r = -0,62$ ; C.O. con H y AE  $r = 0,76-0,94$ ) por la adición de los residuos de café a las muestras de suelo. Las correlaciones directas del contenido de N y de la razón C/N con el C.O., sugieren una relación indirecta de N y C/N con las propiedades físicas a través del C.O. El agua útil, por el contrario, tiene tendencia a disminuir cuando aumentan otras propiedades físicas favorecidas por la adición de café. Agua útil se correlaciona inversamente

con la estabilidad de agregados, humedad -1500 kPa, C.O. y N, y directamente con pH y  $\text{CO}_3^{2-}$ . Ello sugiere, por tanto, que el agua útil depende del suelo original (AU mayor en el suelo V con pH más alto y carbonatado), pero que disminuye también con la adición de café porque ello favorece la retención a -1500 kPa. Se confirma así estadísticamente la discusión previa de las Figuras 9 a 17. Las propiedades físicas de contenido y estabilidad de agregados, retención de agua y densidad aparente mejoran con la adición de posos de café al suelo, pero sin embargo, la disponibilidad de agua disminuye, lo que es un aspecto preocupante.

#### 4.2.4 Análisis factorial

Se han realizado dos análisis factoriales, el primero solo con las propiedades físicas determinadas en este TFG (Tabla 6 y 7) y el segundo incluyendo además propiedades químicas y fisicoquímicas (Tabla 8 y 9).

Para realizar el primer análisis se han utilizado los datos de las siguientes variables:

- Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )
- Humedad (%) -33kPa
- Humedad (%) -1500kPa
- Agua útil (mm/cm)
- Agregados estables (%) >1000
- Agregados estables (%) 1000-250

**Tabla 6.** Análisis de factores para propiedades físicas.

Factor (Número)	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje acumulado
1	3,81863	63,644	63,644
2	1,28888	21,481	85,125
3	0,405845	6,764	91,889
4	0,335634	5,594	97,483
5	0,135386	2,256	99,740
6	0,0156295	0,260	100,000

**Tabla 7.** Matriz de cargas de los factores con eigenvalor >1 después de la rotación varimáx usando propiedades físicas.

	Factor	
	1	2
Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )	-0,849943	-0,171688
Humedad (%) -33kPa	0,962606	0,0409489
Humedad (%) -1500kPa	0,775335	0,555441
Agua útil (mm/cm)	0,106761	-0,915744

Agregados estables (%) >1000	0,42615	0,797305
Agregados estables (%) 1000-250	0,521334	0,760661

El análisis factorial de las propiedades físicas analizadas (Tabla 7) resultó con dos factores que explican el 85% de la variabilidad de los datos. Las variables de mayor carga en el factor 1 son la humedad a -33 kPa y -1500 kPa, relacionadas inversamente con la densidad aparente, también de mayor carga en este factor. La disminución de la densidad aparente es congruente con un aumento del agua retenida. El resto de variables están más cargadas en el factor 2, explicado principalmente por el agua útil (carga = -0,9157), que se relaciona con signo negativo con las dos variables de agregados estables. Esta relación inversa es peculiar dado que indica que la estabilidad repercute negativamente en el volumen de poros de almacenamiento de agua. La estabilidad se está logrando a costa de inutilizar o taponar estos poros. No obstante, este segundo factor también podría estar reflejando que la menor agua disponible y más agregados estables se corresponden con las muestras del suelo rojo. Este suelo tiene más arcilla y cementos férricos, por tanto, dispone de más material agregado de modo estable y resistente a la inmersión en agua y, asimismo más poros residuales que almacenan agua poco disponible.

Para el segundo análisis se han utilizado los datos de las siguientes variables:

- Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)
- Humedad (%) -33kPa
- Humedad (%) -1500kPa
- Agua útil (mm/cm)
- Agregados estables (%) >1000 μm
- Agregados estables (%) 1000-250 μm
- pH
- CE (dS/m)
- C.O. (%)
- N (%)
- C/N
- CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> (%)

**Tabla 8.** Análisis de factores para las propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas.

Factor (Número)	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	5,91382	49,282	49,282
2	3,62141	30,178	79,460
3	0,857468	7,146	86,606
4	0,577409	4,812	91,418
5	0,447743	3,731	95,149
6	0,226214	1,885	97,034
7	0,176614	1,472	98,506

8	0,0887014	0,739	99,245
9	0,0618949	0,516	99,761
10	0,0131361	0,109	99,870
11	0,0103111	0,086	99,956
12	0,00527764	0,044	100,000

**Tabla 9.** Matriz de cargas de los factores con eigenvalor >1 después de la rotación varimax usando propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas.

	Factor	Factor
	1	2
Densidad aparente (g/ml)	-0,759595	-0,2547
Humedad (%) -33kPa	0,834742	0,488734
Humedad (%) -1500kPa	0,967642	-0,0215397
Agua útil (mm/cm)	-0,397181	0,749672
Agregados estables (%) >1000	0,798143	-0,416063
Agregados estables (%) 1000-250	0,830362	-0,412282
pH	-0,0788187	0,92723
CE (dS/m)	0,105141	0,769806
C.O. (%)	0,961405	-0,0533633
N (%)	0,89715	-0,151822
C/N	0,629965	0,203761
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (%)	0,234743	0,955704

Cuando se incluyen las variables químicas junto a las físicas, el modelo factorial se resuelve también con dos factores (Tabla 9) que explican un 79,5% de la variabilidad del sistema suelo+café. El mayor porcentaje de variabilidad en los datos (factor 1, 49,3% de varianza) se debe a las variables C.O., N y C/N cuyo aumento repercute en la estabilización de agregados, disminución de la densidad aparente y aumento de la retención de agua. Todo ello podría ser consecuencia del proceso experimental de adición de café sobre las muestras de suelo. La variabilidad explicada por el factor 2 (30,2% de la varianza total) se debe principalmente a las variables carbonatos, pH y conductividad eléctrica, así como agua útil, ésta última inversamente relacionadas con la anteriores. Este factor podría estar indicando que una parte importante de la variabilidad de los datos se debe a las diferencias originales entre los suelos R y V empleados en el análisis.

En definitiva, los resultados de este análisis sugieren que en todo el sistema constituido por 26 muestras y 12 variables, aproximadamente un 30% de la variabilidad total se corresponde a las diferencias iniciales o características de partida de los suelos. Los suelos V y R tienen propiedades

físicas y químicas significativamente diferentes. Sin embargo, la mayor variabilidad, aproximadamente 50%, se debe al ensayo de adición de posos de café que ha modificado las propiedades iniciales de ambos suelos. En el caso concreto de la variable Agua útil, que se ha destacado anteriormente por lo inusual de su comportamiento, se podría decir, de acuerdo al valor de sus cargas en el Factor 1 (-0,397) y Factor 2 (0,749), que las diferencias encontradas se deben mayoritariamente al factor "tipo de muestra" (Factor 2) y en menor medida al "factor café" (Factor 1). El análisis de varianza (Tabla 5) confirma esta interpretación ya que tanto las fuentes de variación suelo y café tienen efecto sobre el contenido de agua útil, aunque mucho más significativo para suelo ( $F = 12,86$ ) que para café ( $F = 5,35$ ). Justo al contrario ocurre con el resto de variables físicas, como por ejemplo Humedad a -1500 kPa que se afectan principalmente por el "factor café" (mayor carga en este factor).

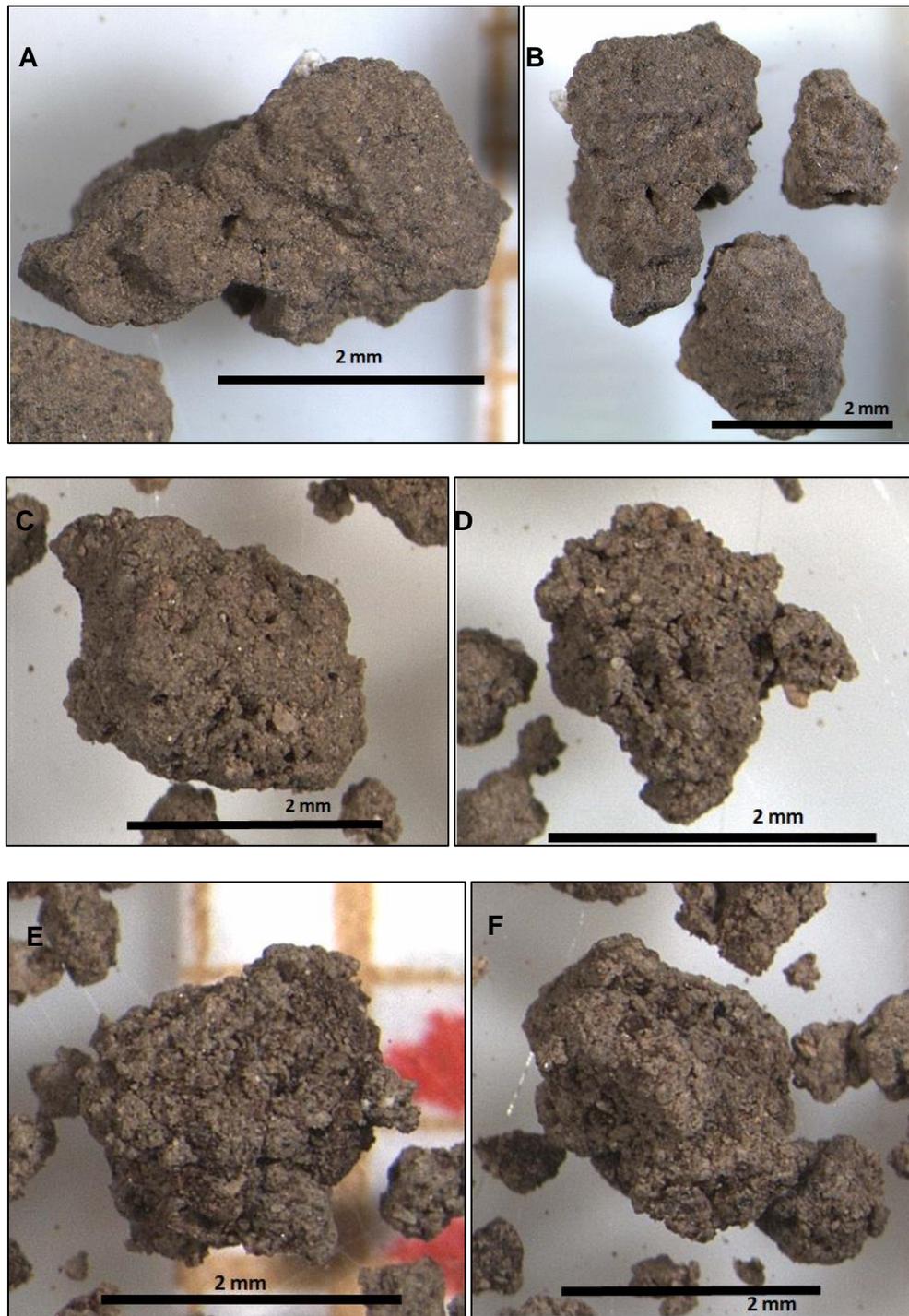
#### **4.3 Resultados de estudio morfológico con estereomicroscopio y SEM.**

El estudio de las muestras con estereomicroscopio (lupa binocular) (Figura 21 y 22) refleja visualmente como las partículas de café entran en contacto con las partículas del suelo, interaccionando entre sí y dando lugar a agregados con una nueva estructura, tanto en el caso de muestras con cultivo como en el de sin cultivo. Se puede observar como en aquellos agregados en los que se ha adicionado posos de café (Figura 21 y 22 E y F), las partículas de estos se disponen formando películas que siguen el patrón de agrietamiento propio del suelo. La adhesión de estas películas orgánicas explicaría la mejora de la estabilidad estructural de los suelos al adicionar PDC. Esta mejora de las propiedades físicas de los suelos se ve apoyada por algunas referencias bibliográficas (Kasongo et al., 2011, Kasongo et al., 2013 y Yamane et al., 2014).

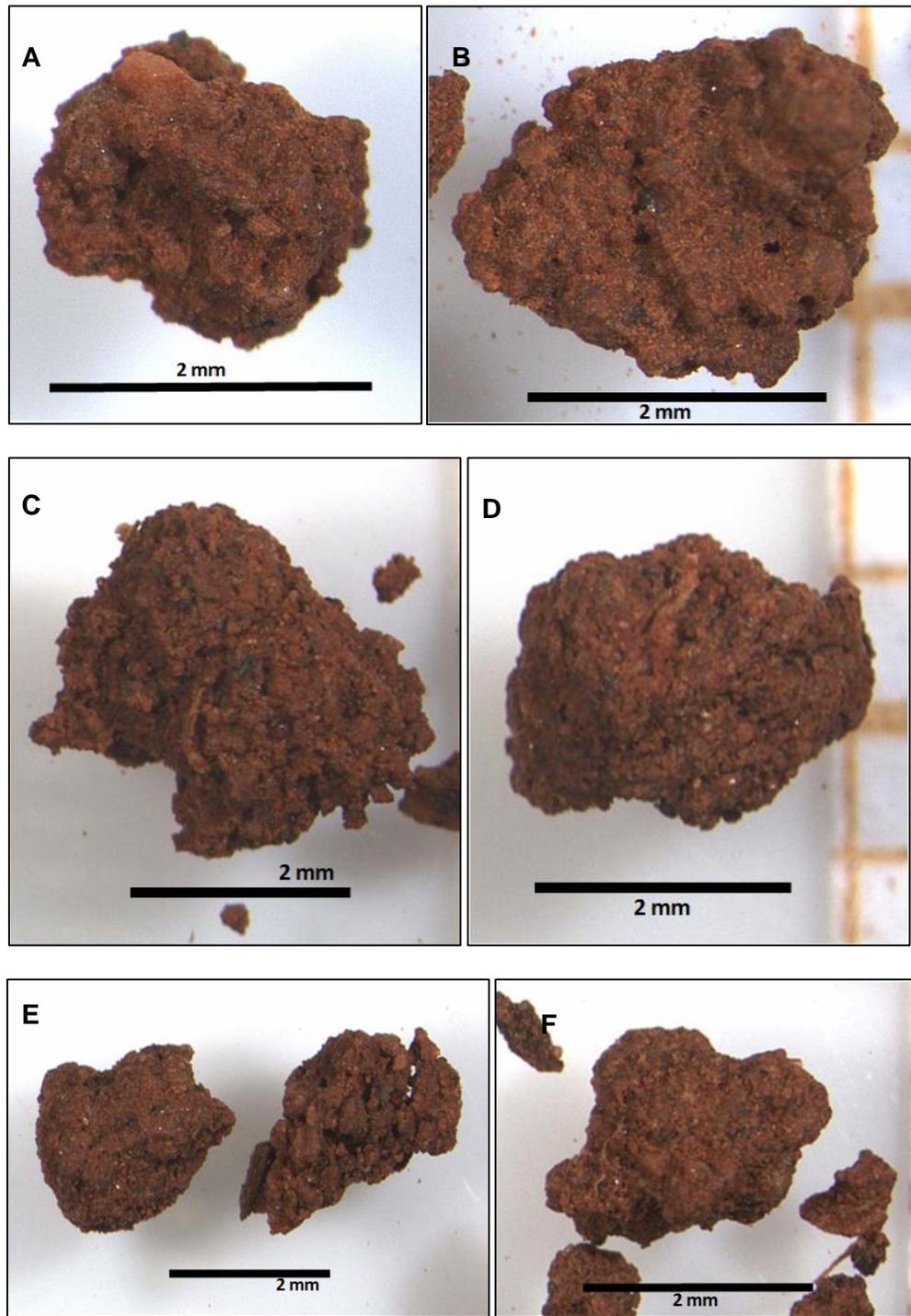
Tanto en el suelo de vega como en el suelo rojo se observa que, respecto a los agregados originales de apariencia más compactada, la incubación bajo condiciones húmedas a capacidad de campo y más aún cuando se añade café, los agregados adquieren un aspecto más abierto y poroso, que se corresponde con una disminución de densidad aparente. Destaca especialmente además que los agregados ganan en jerarquización de unidades estructurales. Los agregados con posos de café están constituidos por otros agregados de menor tamaño unidos por superficies de debilidad duradera y muy distinguible.

De la observación con microscopía electrónica de barrido de los agregados de suelo, con y sin café, se observa un incremento de la actividad biológica en ambos suelos, tanto en el suelo rojo como en el suelo de vega, cuando se agrega café y se incuba el suelo 60 días (Figura 23, 24 y 25). También parece que la adición de café promueve un aumento del tamaño de las bacterias y la segregación de exopolisacáridos bacterianos, lo que se aprecia por la abundancia de filamentos que unen a las bacterias a las partículas sólidas del suelo (Figura 26).

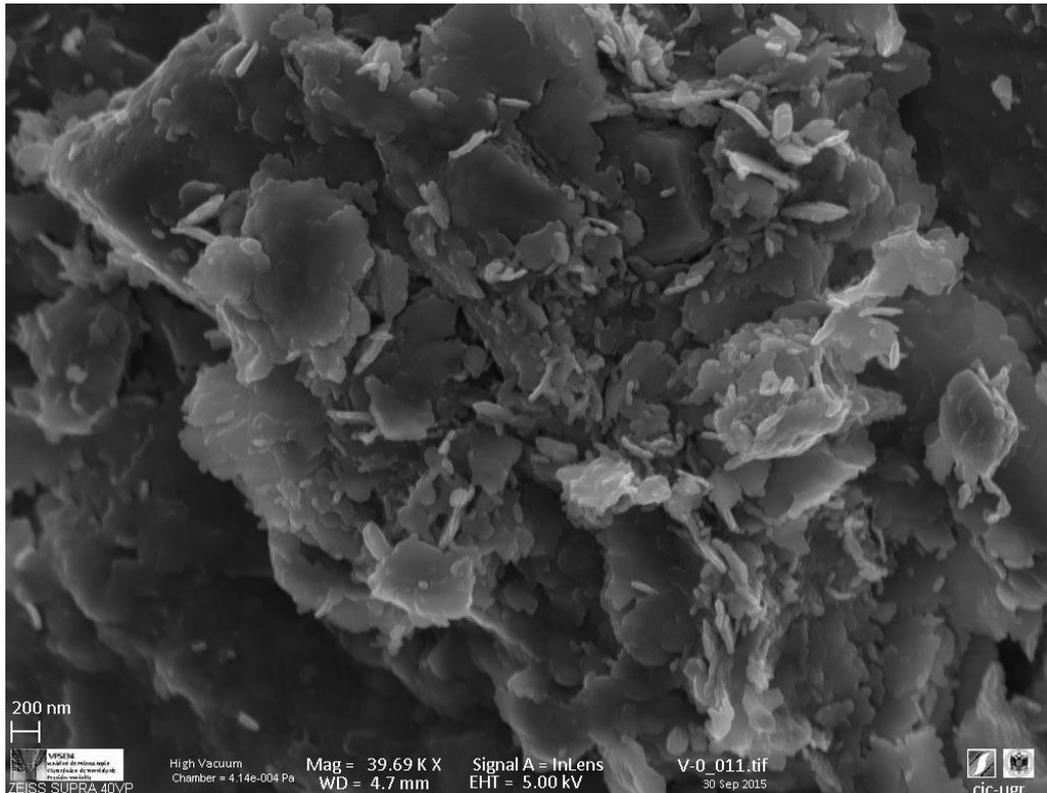
Finalmente, se muestran algunas imágenes de la observación con microscopía electrónica de barrido de los agregados de suelo, con y sin café. Se observa un incremento de la actividad biológica en ambos suelos, tanto en el suelo rojo como en el suelo de vega, cuando se agrega café y se incuba el suelo 60 días (Figura 23, 24 y 25). También parece que la adición de café promueve un aumento del tamaño de las bacterias y la segregación de exopolisacáridos bacterianos, lo que se aprecia por la abundancia de filamentos que unen a las bacterias a las partículas sólidas del suelo (Figura 26).



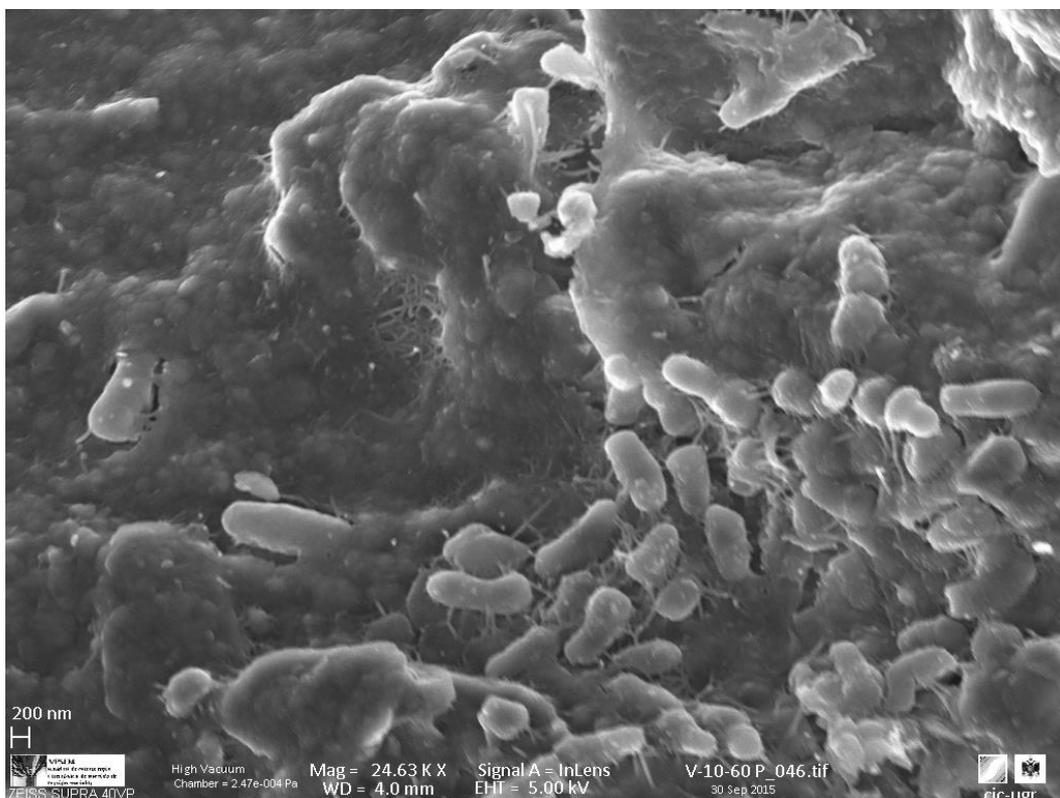
**Figura 21.** Imágenes estereomicroscópicas de peds. A y B: Suelo de Vega sin adición de café y sin cultivo (V0). C y D: suelo de vega sin adición de café y cultivada 60 días (V-0-60). E y F: Suelo de Vega con 10% de posos de café y cultivado 60 días (V-10-60).



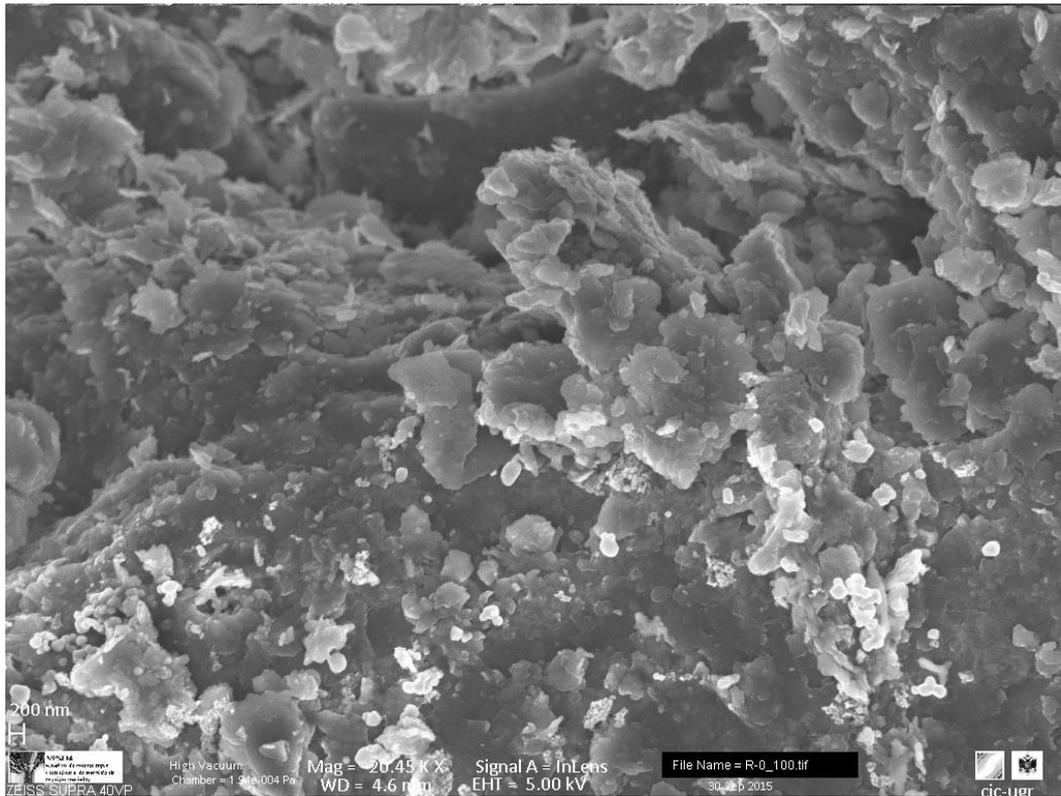
**Figura 22.** Imágenes estereomicroscópicas de peds. A y B: Suelo Rojo sin adición de café y sin cultivo (R0). C y D: Suelo Rojo sin adición de café y cultivado 60 días (R-0-60). E y F: Suelo Rojo con 10% de posos de café y cultivado 60 días (R-10-60).



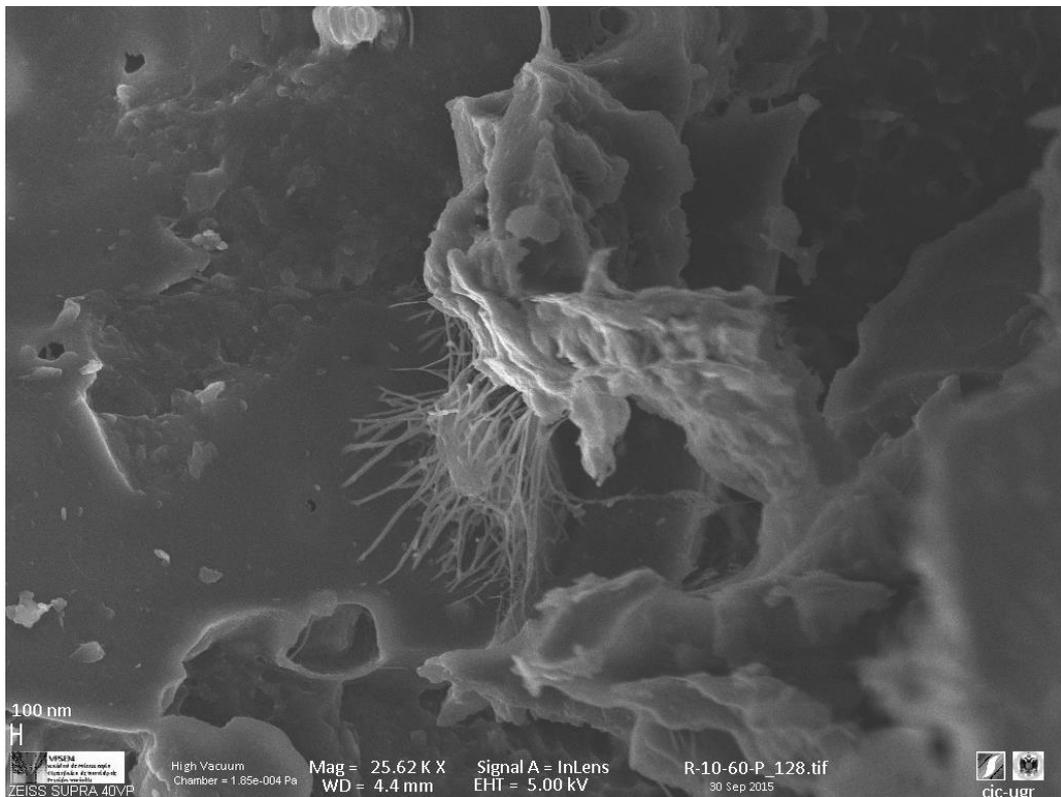
**Figura 23.** Imagen VPSEM de la muestra suelo de vega sin adición de café y sin incubación (agregado de suelo, original). Se aprecian algunos cuerpos bacterianos de pequeño tamaño (0,1-0,2nm) aislados.



**Figura 24.** Imagen VPSEM de la muestra suelo de vega con 10% de posos de café adicionado y cultivado con lechuga, 60 días. Se observan colonias de bacterias cuyo tamaño es casi de 1µm. también se aprecia que las bacterias están fijadas al suelo mediante mucopolisacáridos (EPS), que se observan como hilos que unen a las bacterias a las partículas de suelo.



**Figura 25.** Imagen VPSEM de la muestra suelo rojo sin adición de café y sin incubación (suelo original). Se observan bacterias de pequeño tamaño (0,1-0,2 $\mu$ m) aisladas o en pequeñas colonias.



**Figura 26.** Imagen VPSEM de la muestra suelo rojo con 10% de posos de café adicionado y cultivado con lechuga, 60 días. Se aprecia una bacteria de gran tamaño (algo menos de 1  $\mu$ m) unida intensamente a la fracción mineral del suelo mediante exopolisacáridos (EPS).

La microscopía electrónica de barrido (SEM) demuestra que la incorporación de café al suelo estimula la presencia de microorganismos ya que los posos de café son ricos en celulosa, hemicelulosa y otros compuestos que pueden servir de sustrato para estos organismos heterótrofos. El estímulo de la actividad biológica y de la biodiversidad en el suelo con las enmiendas orgánicas también ha sido descrito por Ameloot et al. (2014) cuando se adiciona biochar al suelo. Sin embargo, estos autores indican que el incremento de la actividad biológica se produce a corto plazo, y con el tiempo, tanto el número de microorganismos como la biodiversidad, decrecen. No obstante, Proietti et al., (2015) cuando adicionan a suelos de olivar los residuos líquidos de la extracción de aceite observan lo contrario, una disminución de la actividad biológica y de la biodiversidad lo que atribuye a la presencia de compuestos tóxicos.

Los microorganismos segregan exopolisacáridos para anclarse a las partículas del suelo. Dichas uniones también promocionan un mecanismo de unión entre partículas minerales, lo cual contribuye a la mejora de la estructura y podría considerarse una de las causas del aumento de la estabilidad estructural cuando se agrega café al suelo. Esta observación coincide con lo reportado por Abdollahi et al. (2014); estos autores concluyen en que los polisacáridos generados por la actividad biológica son los principales responsables de la estabilización estructural, pero no especifican el mecanismo por el cual ocurre esto. Este resultado requeriría de una mayor investigación al respecto concretamente un estudio de las poblaciones bacterianas para demostrar que ha habido modificaciones en cuanto al número, aunque esto se aprecia claramente en la fotografía, y también en la tipología de esas bacterias. Lo cual esto último podría constituir una importante línea de trabajo.

## 5. CONCLUSIONES

Del ensayo de adición de cantidades variables de posos de café a dos suelos agrícolas mediterráneos incubados sin planta o cultivados con lechugas, en un periodo de 60 días, podemos extraer las siguientes conclusiones respecto a las modificaciones de algunas propiedades físicas que los posos de café han inducido en los suelos:

1.- La densidad aparente de ambos suelos ensayados disminuye proporcionalmente a las cantidades de posos de café añadidos.

2.- Las cantidades de agua retenida a  $-33\text{kPa}$  (Capacidad de Campo) y  $-1500\text{kPa}$  (Punto de Marchitamiento permanente), aumentan de manera significativa con la adición de posos de café. Por el contrario, el agua utilizable por las plantas tiene una relación inversamente proporcional con dicha adición.

3.- La estabilidad estructural aumenta significativamente con la adición de posos de café.

4.- Las fuentes de variación de las propiedades físicas estudiadas son, por orden decreciente de importancia: la cantidad de café añadida, el tipo de suelo, y el tiempo o días de incubación. El efecto de la planta no resultó significativo, salvo en alguna interacción de difícil interpretación. El factor café y el factor suelo explican, respectivamente, 50% y 30% de toda la variabilidad del sistema analizado.

5.- La morfología estudiada con estereomicroscopio y VPSEM, está acorde con las afirmaciones anteriores y aporta otros datos de gran interés. Concretamente, los posos de café estimulan la actividad biológica del suelo y la segregación de exopolisacáridos por parte de los microorganismos. Las imágenes VPSEM revelan que estos microorganismos podrían contribuir de forma importante al desarrollo y la estabilidad de la estructura.

6.- Se han encontrado algunas relaciones interesantes entre las propiedades físicas del suelo y también entre estas propiedades y otras de carácter químico o fisicoquímico. Las más destacadas son: las relaciones directas entre el carbono orgánico y la estabilidad estructural y las relaciones también directas entre la estabilidad estructural y la retención de agua a diferentes potenciales.

7.- Las variaciones de las propiedades físicas en los suelos ensayados, con la adición de posos de café, tienen una tendencia similar. No obstante se aprecian algunas diferencias de comportamiento, principalmente a nivel cuantitativo, entre ambos suelos. Esto indica que las futuras investigaciones sobre enmiendas orgánicas deben tener en cuenta la variable suelo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, D., Martínez, R., Muñoz, J., Torres, M., Vargas, G. 2010. Residuos de café, cacao y cladodio de tuna: fuentes promisorias de Fibra Dietaria. *Revista Tecnológica ESPOL*, 23 (2), 63-69.
- Abdollahi, L., Schjonning, P., Elmholt, S., Munkholm, L.J. 2014. The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability. *Soil & Tillage research*, 136: 28-37.
- Ameloot, N., Sleutel, S., Case, S.D.C., Alberti, G., McNamara, N.P., Zavalloni, C., Vervisch, B., Vedove, G., De Neve, S. 2014. C mineralization and microbial activity in four biochar field experiments several years after incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*, 78: 195-203.
- Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of sustainable agriculture* 14: 83-151.
- Andruschkewitsch, R., Geisseler, D., Dultz, S., Joergensen, R.G., Ludwig, B. 2014. Rate of soil-aggregate formation under different organic matter amendments-a short-term incubation experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177, nº2: 297-306.
- Arthur, E., Schjonning, P., Moldrup, P., Razzaghi, F., Tuller, M., De Jonge, L.W. 2014. Soil structure and microbial activity dynamics in 20-month field-incubated organic-amended soils. *European Journal of Soil Science*, 65, nº2: 218-230.
- Auladeagricultura, 2015. El agua en suelo. Consultada el 18 de noviembre de 2015 en <http://auladeagricultura.wikispaces.com/2.+El+agua+en+el+suelo>.
- Baiamonte, G., De Pasquale, C., Marsala, V., Cimo, G., Alonzo, G., Crescimanno, G., Conte, P. 2015. Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments. *Journal of Soils and Sediments*, 15, nº4: 816-824.
- Bronick, C.J., Lal, R. 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma* 124:3-22.
- Café La Nacional. Proceso de producción del café. Consultada el 5 de noviembre de 2015 en <http://www.cafelanacional.com/nosotros/proceso-de-produccion-del-cafe/>.
- Campbell, M., Caillouet, K., Rider, M. 2013. A multispectral index to estimate bare soil wetness American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference, ASPRS 2013. Pages 73-84.
- Di, J., Liu, X., Du, Z., Xiao, X., Yang, G., Ren, T. 2014. Influences of long-term organic and chemical fertilization on soil aggregation and associated organic carbon fractions in a red paddy soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 22, nº10: 1129-1138.
- Doran, J.W., Parkin T.B. 2006. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. p. 25-37. In J.W. Doran and A.J. Jones (ed) *Methods of assessing soil quality*. SSSSA Spec. Publ. 49 SSSA and ASA, Madison, WI.
- Du, Z.L., Wu, W.L., Zhang, Q.Z., Guo, Y.B., Meng, F.Q. 2014. Long-Term Manure Amendments Enhance Soil Aggregation and Carbon Saturation of Stable Pools in North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 13, nº10: 2276- 2285.
- García-Morales, J.L., Álvarez, C. J., Paredes, C., López, E., Fernández, F. J., Bustamante, M. A., Barrera, R., Seoane, S. 2015 De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad. I Recursos Orgánicos. 3 Residuos agroalimentarios. Madrid: Mundi-Prensa.
- Hansen, V., Muller-Stover, D., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Henriksen, U.B., Hauggaard-Nielsen, H. 2015. Gasification biochar as a valuable by-product for carbon sequestration and soil amendment. *Biomass & Bioenergy*. 72: 300-308.
- Hua, L., Lu, Z.Q., Ma, H.R., Jin, S.S. 2014. Effect of Biochar on Carbon Dioxide Release, Organic Carbon Accumulation, and Aggregation of Soil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33, nº3: 941-946.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). 2012. Cantidad de residuos generados por actividad económica (CNAE-2009), clase de residuo y tipo de peligrosidad. [www.ine.es](http://www.ine.es)
- Kasongo, R.K., Verdoodt, A., Kanyankagote, P., Baert, G., Van Ranst, E. 2011. Coffee waste as an alternative fertilizer with soil improving properties for sandy soils in humid tropical environments. *Soil Use and Management*, 27(1), pp.94–102. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-2743.2010.00315.x>.
- Kasongo, R.K., Verdoodt, A., Kanyankagote, P., Baert, G., Van Ranst, E. 2013. Response of Italian ryegrass ( *Lolium multiflorum* Lam.) to coffee waste application on a humid tropical sandy soil. *Soil Use and Management*, 29(1), pp.22–29. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/sum.12006>.
- Khademalrasoul, A., Naveed, M., Heckrath, G., Kumari, K.G.I.D., Jonge, L.W., Elsgaard, L., Vogel, H.J., Iversen, B.V. 2014. Biochar Effects on Soil Aggregate Properties Under No-Till Maize. *Soil Science*, 179, nº6: 273-283.

- Ley de residuos y suelos contaminados, Ley 22/2011 de 28 de julio. BOE, 29 de julio de 2011, núm. 181. Sec. I. Pág. 85650.
- Li, N., Yao, S.H., You, M.Y., Zhang, Y.L., Qiao, Y.F., Zou, W.X., Han, X.Z., Zhang, B. 2014. Contrasting development of soil microbial community structure under no-tilled perennial and tilled cropping during early pedogenesis of a Mollisol. *Soil Biology & Biochemistry*, 77: 221-232.
- Liu, Z., Mi, B., Jiang, Z., Fei, B., Cai, Z., Liu, X. 2016. Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renewable Energy*, 86: 1–7.
- Liu, Z.X., Chen, X.M., Jing, Y., Li, Q.X., Zhang, J.B., Huang, Q.R. 2014. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil. *Catena*, 123: 45-51.
- Mizuta, K., Taguchi, S., Sato, S. 2015. Soil aggregate formation and stability induced by starch and cellulose. *Soil Biology & Biochemistry*, 87: 90-96.
- Ospina, J. E. 2001. Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. Bogotá D.C.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Poch, R. M. 2008. Introducción a la edafología: uso y protección del suelo. Madrid: Mundi-Prensa.
- Planetica. 2011. Clasificación de los residuos. Consultada el 9 de noviembre de 2015, en <http://www.planetica.org/clasificacion-de-los-residuos>.
- Proietti, P., Federici, E., Fidati, L., Scargetta, S., Massaccesi, L., Nasini, L., Regni, L., Ricci, A., Cenci, G., Gigliotti, G. 2015. Effects of amendment with oil mill waste and its derived-compost on soil chemical and microbiological characteristics and olive (*Olea europaea* L.) productivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 207: 51-60.
- Rathinavelu, R., Graziosi, G. 2005. Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café. Organización internacional del café. ED 1967/05.
- Residuos profesional. 2015. Convierten residuos agroindustriales en productos de alto valor añadido. Consulta el 29 de noviembre de 2015 en <http://www.residuosprofesional.com>.
- Rodríguez Martín, J.A., Álvaro-Fuentes, J., Gonzalo J., Gil, C., Ramos-Miras J.J., Grau Corbí, J.M., Boluda, R. 2016. Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma* 264: 117–125.
- Schaetzl, R.J., Anderson, S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Sánchez-Marañón, M., Martín-García, J.M., Delgado, R. 2011. Effects of the fabric on the relationship between aggregate stability and color in a Regosol-Umbrisol soilscape., *Geoderma*, 162:86-95.
- Wild, A. 1992. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Rusell*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Volverás, B., Amézquita, E. 2009. Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *ACTA AGRON (PALMIRA)*, 58 (1), 35-39.
- Wang, F., Tong, Y.A., Gao, P.C., Zhang, J.S., Weil, R.R., Coffie, J.N. 2014. Organic Amendments to a Wheat Crop Alter Soil Aggregation and Labile Carbon on the Loess Plateau, China. *Soil Science*, 179, nº3: 166-173.
- Wu, Y., Xu, G., Lu, Y., Shao, H. 2014. Effects of Biochar Amendment on Soil Physical and Chemical Properties: Current Status and Knowledge Gaps. *Advance in Earth Sciences*, 29, nº1: 68-79.
- Yamane, K., Kono, M., Fukunaga, T., Iwai, K., Sekine, R., Watanabe, Y., Iijima, M. 2014. Field Evaluation of Coffee Grounds Application for Crop Growth Enhancement, Weed Control, and Soil Improvement. , 17(January 2013), pp.93–102.
- Zhang, Q.Z., Du, Z.L., Lou, Y.L., He, X.H. 2015. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions. *Catena*, 127: 26-31.
- Zornoza, R., Acosta, J.A., Martínez-Martínez, S., Faz, A., Baath, E. 2015. Main factors controlling microbial community structure and function after reclamation of a tailing pond with aided phytostabilization. *Geoderma*, 245: 1-10.



*UGR*

Universidad  
de **Granada**

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD DE  
GRANADA