

## Trabajo Fin de Grado

PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCHAR  
DERIVADO DE SARMIENTO DE VIÑA (*Vitis vinifera*).  
ESTUDIO PRELIMINAR DE SU APLICACIÓN SOBRE  
EL DESARROLLO DE PLANTAS GRAMÍNEAS

Autor

Jon Moreno Oliva

Directores

Joan J. Manyà Cervelló  
María Videgain Marco

Escuela Politécnica Superior  
Año  
2017



## **RESUMEN**

La utilización de biochar como enmienda orgánica en el suelo es una de las aplicaciones que ofrece este material. Muchos trabajos de investigación han confirmado la mejora de las propiedades del suelo con la adición de biochar, estimulando el desarrollo de los cultivos y el secuestro de carbono en el suelo. Se requiere todavía de mucha investigación y desarrollo para conocer las características específicas de cada biomasa de biochar y su posible influencia sobre el sistema suelo-planta-microorganismos.

El presente estudio realiza un análisis sobre las características físico-químicas básicas y mecánicas del biochar de sarmiento, y un primer acercamiento sobre su aplicación e influencia sobre cultivos de gramíneas. La caracterización mecánica pretende conocer su comportamiento en el momento de su aplicación sobre el suelo mediante el uso de maquinaria agraria. Destacar que esta caracterización es novedosa, debido a que no existe otro estudio que presente este tipo de información.

De los resultados obtenidos, lo más relevante ha sido que la temperatura de pirólisis afecta a los factores físicos del biochar, haciendo que sus características, tales como tamaño, longitud y factor de forma, varíen y tengan un comportamiento diferente en el momento de su aplicación.

## **PALABRAS CLAVE**

Biochar, Enmienda orgánica, Sarmiento de vid, Caracterización.



## **ABSTRACT**

Biochar can be used as organic amendment. Many research works have confirmed the improvement of soil properties with biochar addition, stimulating the development of crops and soil carbon sequestration. Nowadays, it is necessary to investigate biochar characteristics to know its influence on the soil-plant-microorganism system.

This scientific study analyzes the basic physic-chemical and mechanical characteristics of vine shoot-derived biochar and the influence of its application on grass crops. The mechanical characterization is done to know what will happen when it will be applied on the soil with farm equipments. This is a new characterization, because there isn't any other published study that gives this kind of information.

The most important result is that pyrolysis temperature has an influence on biochar physical parameters, modifying its size, length and shape parameters and they will have different behaviour when they will be applied into the soil.

## **KEYWORDS**

Biochar, Organic amendment, Vine shoot, Characterization



## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN .....	11
1.1.	Antecedentes .....	11
1.2.	Características y composición del biochar .....	16
1.3.	Efectos sobre el sistema suelo-planta-microorganismos.....	19
1.4.	Biomasa de estudio .....	21
2.	OBJETIVOS .....	23
3.	METODOLOGÍA.....	24
3.1.	Producción de biochar .....	24
3.2.	Caracterización química básica de la biomasa inicial y del biochar producido .....	29
3.2.1.	Análisis inmediato .....	30
3.2.2.	Análisis elemental .....	31
3.2.3.	Análisis fracción inorgánica .....	31
3.2.4.	Análisis químico convencional para enmiendas orgánicas .....	31
3.3.	Caracterización física y mecánica del biochar .....	32
3.4.	Recogida y caracterización del material edáfico para su uso en bioensayo con biochar.....	34
3.4.1.	Caracterización físico-química.....	34
3.4.2.	Caracterización biológica .....	34
3.5.	Instalación de bioensayos en invernadero.....	37
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1.	Producción del biochar.....	43
4.2.	Caracterización química básica de la biomasa inicial y biochar producido .....	44
4.2.1.	Biomasa inicial.....	44
4.2.2.	Biochar producido .....	47
4.3.	Características físicas y mecánicas del biochar .....	49
4.4.	Características material edáfico .....	54
4.4.1.	Caracterización físico-química.....	54
4.4.2.	Caracterización biológica .....	55
4.5.	Bioensayos: resultados preliminares de la influencia del biochar .....	57
5.	CONCLUSIONES .....	64
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	65
7.	ANEXOS .....	70





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Procesos termoquímicos de pirólisis y descripción de los tiempos de residencia (Tr) .	26
Tabla 2. Usos del sarmiento de viña según fracciones.....	27
Tabla 3. Grupos microbianos analizados y su normativa ISO y metodología. ....	36
Tabla 4. Relación de tratamientos en los bioensayos .....	38
Tabla 5. Cantidad de biochar a aplicar por volumen de cada alveolo. ....	39
Tabla 6. Cantidad de biochar a aplicar por volumen de cada macetero. ....	41
Tabla 7. Resultados de cada experimento de producción del biochar. ....	43
Tabla 8. Resultados del análisis inmediato del sarmiento de vid en porcentaje en masa.....	44
Tabla 9. Resultados del análisis elemental del sarmiento de vid en porcentaje en masa. ....	45
Tabla 10. Resultados del análisis de la fracción inorgánica del sarmiento de vid en porcentaje en masa .....	46
Tabla 11. Resultados del análisis inmediato del biochar en porcentaje en masa.....	47
Tabla 12. Resultados del análisis elemental del biochar en porcentaje en masa. ....	48
Tabla 13. Resultados de cada determinación por tipo de biochar realizado por laboratorio externo. ....	49
Tabla 14. Resultados promedios de longitud, masa, volumen, diámetro, coef, forma y densidad de las muestras de biochar. ....	50
Tabla 15. Resultados de fracciones finas y gruesas del biochar antes y después del procesado mecánico. ....	52
Tabla 16. Resultados de cada determinación por tipo de suelo. ....	55
Tabla 17. Resultados del NMP de propágulos micorrícicos .....	55
Tabla 18. Resultados promedios de las mediciones de crecimiento de cebada por muestras y semana. ....	58
Tabla 19. Análisis estadístico de resultados semana 2 y suelo 1. ....	59
Tabla 20. Análisis estadístico de resultados semana 2 y suelo 2. ....	60
Tabla 21. Análisis estadístico de resultados semana 3 y suelo 1. ....	61
Tabla 22. Análisis estadístico de resultados semana 3 y suelo 2. ....	62



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aportes de la aplicación de biochar. Adaptado de Lehmann y Joseph (2009). ....	12
Figura 2. Comparación perfil suelos adyacentes (izquierda) y suelos <i>terra preta</i> (derecha). ....	13
Figura 3. Ciclo del carbono sin aplicación de biochar en el suelo y con ella.....	14
Figura 4. Reducción neta de emisiones de GEI. Adaptado de Woolf y col. (2010).....	15
Figura 5. Viñedo con restos de poda.....	22
Figura 6. Reactor de pirólisis ubicado en la EPSH. ....	24
Figura 7. Sistema experimental para el proceso de pirólisis en lecho fijo.....	25
Figura 8. Sarmiento, Cesta, reactor y horno del sistema de pirólisis.....	27
Figura 9. Localización de los termopares a distintas alturas. Azuara y col. (2016).....	28
Figura 10. Perfiles de temperatura del proceso de pirólisis del sarmiento de viña a 600 °C. ....	29
Figura 11. Biochar a la salida del reactor. Gránulos de biochar que suponen el 10% en peso de fracción gruesa en una de las muestras.....	32
Figura 12. Removedor similar a maquinaria con el biochar en su interior. ....	33
Figura 13. Disposición de las diluciones de suelo para análisis del NMP de poblaciones micorrícicas. ....	36
Figura 14. Germinación de las plantas de cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> ). ....	40
Figura 15. Plantas desarrolladas del cultivo de cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> ).....	41
Figura 16. Situación del bioensayo de sorgo ( <i>Sorghum bicolor L.</i> ) al finalizar el presente proyecto. ....	42
Figura 17. Media y error estándar de la media (SEM) del parámetro longitud para cada tipo de biochar .....	51
Figura 18. Media y error estándar de la media (SEM) del factor densidad para cada tipo de biochar .....	51
Figura 19. Media y desviación estándar del factor forma para cada tipo de biochar .....	52
Figura 20. Porcentaje de tamaño de partícula fino por tipos de biochar. ....	53
Figura 21. Porcentaje de tamaño de partícula gruesos por tipos de biochar.....	53
Figura 22. Algunas de las placas de Petri sembradas.....	56
Figura 23. Resultado análisis microbiano de las muestras de suelo. ....	57
Figura 24. Tallos rojizos de las plantas de cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> ). ....	57
Figura 25. Realizando la instalación del bioensayo de sorgo ( <i>Sorghum bicolor L.</i> ).....	63



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Uno de los grandes problemas a los que nos enfrentamos actualmente es la pérdida de suelo, recurso no renovable imprescindible para los ecosistemas terrestres naturales y antrópicos. Su carácter de recurso no renovable hace que cualquier proceso de degradación que sufra tenga, en la mayoría de los casos, consecuencias irreversibles (Meco y col., 2011).

El manejo de este recurso desde la agricultura convencional requiere de la utilización de grandes cantidades de insumos y energía para mantener sus capacidades productivas, presentando grandes riesgos de desertificación, erosión, pérdida de materia orgánica, contaminación de aguas subterráneas y pérdida de biodiversidad (FiBL, 2007).

En este contexto, hoy en día los esfuerzos de los investigadores y técnicos se dirigen hacia la investigación sobre el desarrollo de modelos de gestión agropecuaria sostenible, manteniendo una productividad de calidad acorde con la capacidad del suelo de cultivo, buscando que sean económicamente viables, desde el punto de vista ambiental, buscando el aumento de la biodiversidad y la materia orgánica, y facilitando las condiciones para un óptimo secuestro de carbono, lo que implica la mitigación del cambio climático, la disminución de la erosión y contaminación del suelo y la óptima gestión del agua (Meco y col., 2011).

Actualmente, se está investigando sobre la utilización del biochar como enmienda orgánica en suelo agrícola. Se trata de un material carbonoso obtenido a partir de biomasa mediante descomposición térmica a temperaturas inferiores a 700°C y baja o nula concentración de oxígeno, en un proceso conocido como pirólisis (García y col., 2014).

Científicos y organismos internacionales dedicados al estudio y desarrollo de este material denominan a este compuesto como *biochar* cuando su destino es la aplicación como enmienda orgánica de suelos y para el secuestro de carbono en los mismos. De esta manera se diferencia del tradicional carbón vegetal destinado a combustible (Lehmann y Joseph, 2009).

El uso del biochar puede suponer una mejora de la productividad de suelos agrícolas, además de suponer una valorización de residuos y una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Puede actuar como enmienda de suelos aumentando su fertilidad como consecuencia del aumento de la capacidad de intercambio catiónico de los mismos y del aumento del pH (Lehmann y Joseph, 2009). Además, la utilización de biochar lleva asociados beneficios

ambientales importantes, gracias al aumento de la capacidad de retención de agua y de nutrientes, lo que implica la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de los suelos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$ ) y la mejora de la calidad del agua (reducción de lixiviados). También, al tratarse de una sustancia estable rica en carbono es interesante como estrategia para luchar contra el cambio climático, ya que puede ser útil para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ , debido a que mediante su aplicación en suelos comporta un sumidero de carbono. Algunos autores se refieren al uso del biochar como una estrategia que implica un ciclo negativo de carbono y, por lo tanto, la vía más interesante para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  mediante el uso de biomasa (Fowles, 2007 y Gaunt y col., 2008).



**Figura 1. Aportes de la aplicación de biochar. Adaptado de Lehmann y Joseph (2009).**

La investigación y el estudio del biochar como enmienda de suelos son recientes. Sin embargo, el uso del carbón vegetal fue tema de investigaciones relacionadas con la agricultura a finales del S. XIX y a lo largo del S. XX en países como Inglaterra y Japón. En este último país, es común el uso del biochar en suelos, así se ha encontrado detallado su uso en viejos textos de agricultura del año 1697, y fue durante la década de los años ochenta cuando se intensificó su investigación (Lehmann, 2009).

El principal motivo del interés originado en los últimos años por la aplicación en suelos de este material pirogénico se debe principalmente a dos hechos: en primer lugar, debido al descubrimiento de partículas similares al carbón en suelos muy fértiles y de alto contenido en carbono del Amazonas en Brasil, denominados localmente como *Terra preta do Indio* (Lehmann, 2009), y en segundo lugar debido a investigaciones publicadas que han demostrado

la recalcitrancia (resistencia a descomponerse en los elementos químicos que lo conforman, debido a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales) de este material frente a otras enmiendas orgánicas y su contribución al incremento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Sohi y col., 2009).

La *terra preta* descubierta en los suelos de la región amazónica es localmente popular para la producción de cultivos comerciales como la papaya y el mango, debido a que crecen más rápido en esta tierra en comparación con el suelo circundante. Este ha mantenido una alta fertilidad a pesar de su uso continuado (respecto a los suelos de alrededor sin material carbonizado), lo que se ha relacionado con la estabilidad del carbono en el suelo.



**Figura 2. Comparación perfil suelos adyacentes (izquierda) y suelos *terra preta* (derecha).**

Recuperado de [www.biochar-international.org](http://www.biochar-international.org), (2017)

Se caracteriza por un horizonte antrópico de color oscuro con alto contenido de materia orgánica y de nutrientes como N, P, K y Ca (Figura 2). Muchos aspectos del origen de estos suelos todavía no están resueltos, teniendo como hipótesis principal, el haber sido formados durante el periodo precolombino y abandonados después de la invasión europea durante la colonización (Kern y Kämpf, 1989). Se considera que la fuente de carbón ha sido la biomasa parcialmente quemada de los incendios domésticos y la quema en el campo, pero la extensión de los depósitos sugiere que las aplicaciones fueron cada vez más deliberadas, presumiblemente como una estrategia de manejo para abordar la baja fertilidad del suelo (Sohi y col., 2009).

El carbono capturado por la biomasa mediante la fotosíntesis se emite a la atmósfera por procesos naturales como la descomposición o por el uso antrópico de biocombustibles, lo que supone un balance cero de carbono. El uso de biochar supone un ciclo negativo del

carbono al transformar el carbono contenido en la biomasa en estructuras carbonosas más estables, permitiendo el secuestro de este en el suelo durante cientos o miles de años. El resultado es una reducción neta de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Figura 3).

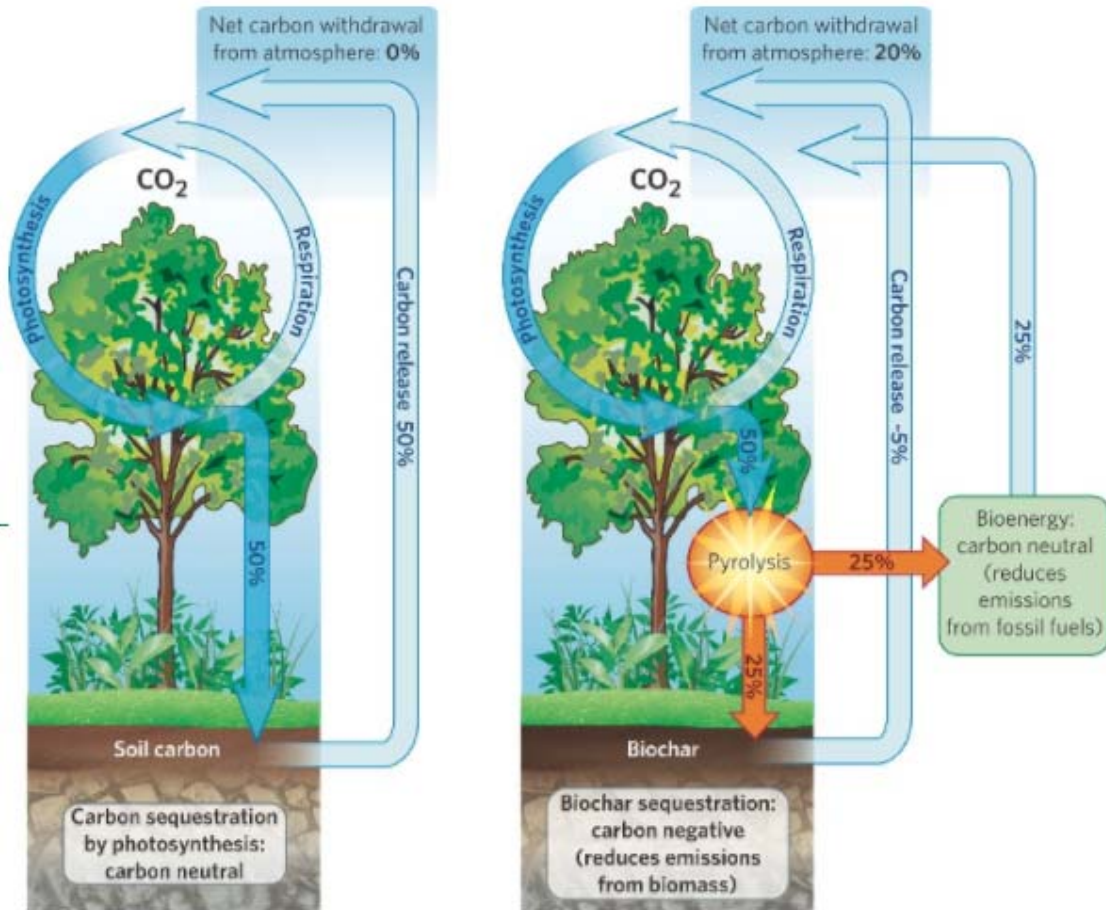


Figura 3. Ciclo del carbono sin aplicación de biochar en el suelo y con ella.

Recuperado de [www.biochar-international.org](http://www.biochar-international.org), (2017)

Según un estudio destacado (Woolf y col., 2010), la implementación sostenible del biochar en suelos tiene el potencial de hacer una contribución a la mitigación del cambio climático. Supusieron tres escenarios posibles MSTP (Máximo Potencial Técnico Sostenible), Alpha y Beta, en función de la biomasa disponible.

La Figura 4 (Woolf y col., 2010) muestra las emisiones evitadas atribuibles a la producción sostenible de biochar o la combustión de biomasa durante 100 años, en relación con el uso actual de la biomasa. En rojo se presenta el MSTP, en azul el Beta y en negro el Alpha. El uso de biochar sostenible está representado por líneas continuas y la combustión de biomasa por



líneas discontinuas. La gráfica superior muestra las emisiones anuales evitadas; la gráfica inferior emisiones acumuladas evitadas durante 100 años.

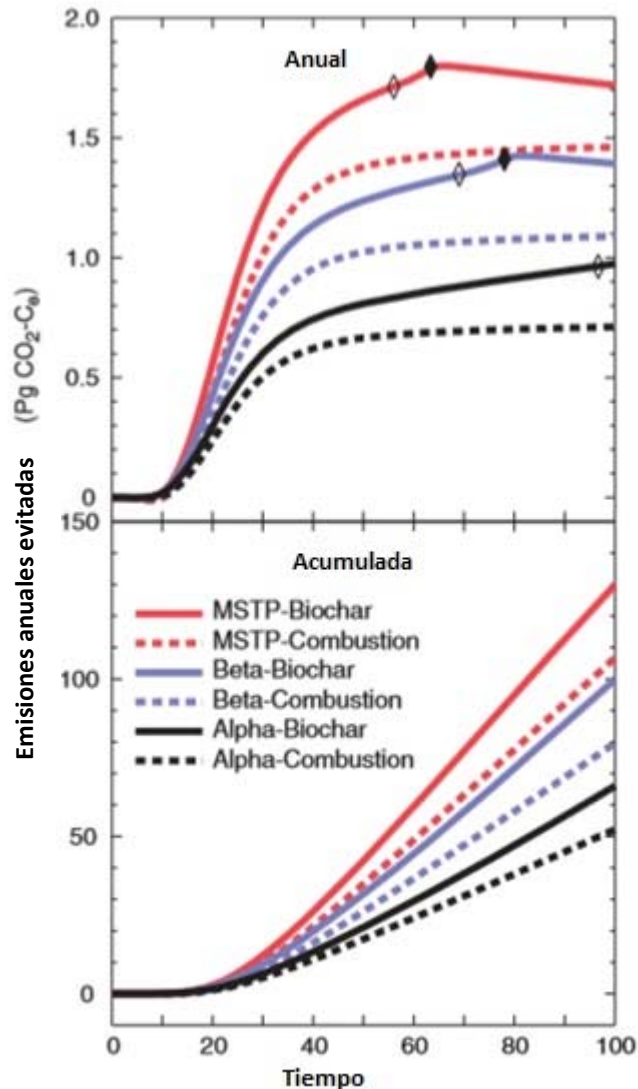


Figura 4. Reducción neta de emisiones de GEI. Adaptado de Woolf y col. (2010)

Además, la incorporación del biochar en el suelo no solo supone secuestro de carbono, sino que además aporta los siguientes beneficios medioambientales (IBI, 2017):

- Fertilidad en suelo: Incrementa la fertilidad del suelo, estimulando el crecimiento de la planta, la cual consume mayor cantidad de CO<sub>2</sub>.
- Reducción de fertilizantes: reduce la necesidad de fertilizantes químicos, reduciendo así la emisión de gases de efecto invernadero.

- Reducción de emisiones de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>: mejora la capacidad de retención de agua y de nutrientes, lo que implica la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de los suelos como N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>.
- Mejora de la vida microbiana del suelo: crecimiento microbiano que fijan en el suelo el carbono atmosférico.
- Reducción de las emisiones por materia prima: convierte los residuos de biomasa agraria y forestal en biochar, reducción las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> por descomposición natural o quema de estos.
- Energía generada: La energía calorífica y los co-productos obtenidos de la pirólisis (gas y bio-oil) se pueden utilizar como energías renovables que pueden sustituir a otros que no lo sean.

## 1.2. Características y composición del biochar

La composición física y química del biochar es compleja debido a que la materia prima que se utiliza para elaborarlo es muy heterogénea y a que durante su proceso de producción se producen una gran variedad de reacciones químicas.

Los componentes principales del biochar son los siguientes: carbono fijo, materia volátil, sustancias minerales (cenizas) y humedad (Antal y Gronli, 2003). Conforme se aumenta la temperatura de pirólisis, se incrementa la proporción de carbono aromático presente en el biochar, debido al aumento relativo en la pérdida de material volátil (inicialmente agua, seguido por hidrocarburos, vapores alquitranados, H<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>), y la conversión de alquilos (Baldock y Smernik, 2002; Dermibas, 2004). Una alta concentración de estos carbonos aromáticos podría tener efectos tóxicos sobre el sistema suelo-planta-microorganismos.

El biochar obtenido del proceso de pirólisis posee un conjunto único de características estructurales y químicas, con un alto contenido de carbono que forma compuestos aromáticos caracterizados por anillos de seis átomos de C unidos entre ellos (bencenos). Si estos anillos aromáticos se organizaran en láminas perfectamente apiladas, formarían grafito.

Bajo las temperaturas a las que se obtiene el biochar, el carbono se organiza de un modo más irregular, conteniendo oxígeno e hidrógeno y, en algunos casos, minerales (cenizas incrustadas en los poros), en función de la materia prima empleada.

La evaluación de las propiedades químicas del biochar es útil para conocer el proceso de envejecimiento. Enders y col. (2012) han propuesto el uso del contenido de materia orgánica volátil (MOV) junto con la relación molar O/C y H/C para establecer la estabilidad del biochar.

Los análisis de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia de rayos X (XPS), espectroscopia con energía dispersiva de rayos X (EDX) y espectroscopia de rayos X por estructura de absorción fina (NEXAFS) (Baldock y Smernik, 2002; Lehmann y col., 2006), son las técnicas que se han utilizado para analizar químicamente la superficie del biochar en detalle, y poder así establecer diferencias entre muestras de distintas procedencias. Estos análisis ofrecen información cualitativa que permite predecir los mecanismos de envejecimiento y funcionalidad del biochar (García y col., 2014).

La caracterización biogeoquímica (interacción entre los compuestos geoquímicos y los organismos vivos) también puede ayudar a entender la posible función agronómica del biochar a nivel de suelo, para así facilitar un proceso de producción de biochar que ofrezca beneficios específicos para el cultivo. Se ha definido un conjunto de siete propiedades clave para la evaluación del biochar (Okimori y col., 2003):

- pH.
- Contenido de compuestos volátiles.
- Contenido de ceniza.
- Capacidad de retención hídrica.
- Densidad aparente.
- Volumen de poro.
- Área superficial específica.

La temperatura final de pirólisis es el parámetro más importante que afecta a las propiedades anteriores (a parte de la naturaleza de la biomasa precursora), ya que el contenido de carbono fijo (más estable) en el biochar será inversamente proporcional al propio rendimiento del biochar (Okimori y col., 2003). El rendimiento de biochar puede disminuir también sin ningún aumento adicional en la concentración de carbono en su interior; sin embargo, puesto que la ceniza está ampliamente conservada durante la pirólisis, el contenido de cenizas del carbón vegetal aumenta con la temperatura.

El contenido de carbono total en el biochar se encuentra entre 172 y 905 g/Kg, a pesar de ello, la media se encuentra por debajo de los 550 g/kg para una amplia variedad de materiales de acuerdo con Chan y Xu (2009). El contenido de nitrógeno total varía entre 1,7 y

78,2 g/Kg, dependiendo de la materia prima (Chan y Xu, 2009). A pesar de ser alto el contenido de nitrógeno total presente en el biochar, se encuentra principalmente en una forma no biodisponible, por lo que no supone beneficio para el cultivo.

El contenido de fósforo total y potasio total presentes en el biochar se encuentran en un amplio rango de acuerdo a las materias primas utilizadas (Chan y Xu, 2009), pero los rangos de nitrógeno, fósforo y potasio totales que se presentan en el biochar son más amplios que los que aparecen recogidos en la literatura para los fertilizantes orgánicos típicos (García y col., 2014).

La técnica analítica microscopía electrónica de barrido (SEM) puede utilizarse para describir la estructura física. La estructura macroporosa (poros de aproximadamente 1 mm de diámetro) del carbón vegetal producido a partir de material vegetal lignocelulósico hereda la arquitectura de la materia prima, y es potencialmente importante para la retención de agua y la capacidad de adsorción del suelo (Day y col., 2005). La superficie específica medida por adsorción de gas, sin embargo, es mayormente microporosa (poros inferiores a 2 nm). La temperatura de proceso es el principal factor que determina la superficie, lo que lleva a sugerir que el biochar creado a temperatura baja puede ser adecuado para controlar la liberación de nutrientes de los fertilizantes (Day y col., 2005), mientras que aquellos generados a altas temperaturas darían lugar a materiales análogos al carbón activado (familia de adsorbentes carbonáceos altamente cristalinos con una porosidad interna altamente desarrollada) (Ogawa y col., 2006).

Ennis y col. (2012) estudiaron características de distintos biochars, y señalaron también que dichos “productos” muestran una elevada capacidad de retención hídrica, debido a su composición química; también definen una amplia capacidad superficial para estos productos carbonosos así como una elevada capacidad de intercambio catiónico.

Toda esta información que hace referencia a características de los biochars dentro del ámbito físico-químico, no significa que sean dichas características las únicas que interesan, pues también estos investigadores ponen de manifiesto que los biochars van a tener incidencia sobre la biota del suelo donde se adicionen, y este aspecto sobre su efecto en la diversidad del suelo debe ser tenido en cuenta.

### 1.3. Efectos sobre el sistema suelo-planta-microorganismos

La información referente al efecto del biochar sobre el sistema suelo-planta-microorganismos es reciente y con resultados variables en función de las condiciones bajo las que han sido realizados los estudios.

Una de las ventajas conocidas es que debido a la estabilidad del biochar, el carbono puede ser almacenado en el suelo durante cientos de años, mejorando el crecimiento de las plantas y suponiendo un secuestro de carbono (Lehmann y col., 2006). Sin embargo, se ha descubierto una fracción del biochar que no sería estable a largo plazo (Sohi y col., 2009). Faltan estudios que investiguen acerca de la estabilidad del biochar a corto y largo plazo bajo suelos y climas diferentes. La cantidad de fracción estable y lábil en el biochar viene dada por las condiciones de combustión, las características de la materia prima utilizada en la producción de biochar y por los objetivos principales que se planteen para el proceso de pirólisis: obtención de energía o biochar, ya que también influiría sobre la estabilidad del biochar producido al ser éste de diferentes características en función del tipo de pirólisis (Sohi y col., 2009).

Otro aspecto conocido es el aumento de la disponibilidad de nutrientes para las plantas debido a la mejora de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (CIC), a la estimulación de los procesos biológicos que permiten mejorar la estructura del suelo y a la capacidad de almacenamiento de agua (Fowles, 2007, Glaser y col., 2000). Estos autores también destacan la capacidad de este material pirogénico para reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, aumentar el pH del suelo y la absorción de pesticidas y metales pesados (Major, 2010).

La aplicación del biochar permitiría también reducir el laboreo mecánico debido a las mejoras aportadas en su uso como enmienda orgánica en suelos, la reducción de la densidad aparente y el aumento de materia orgánica. Además, debido al aumento en la capacidad de retención de agua también se reducirían los costes en irrigación. En un estudio, Glaser (2002) encontró en suelos de *terra preta* una capacidad de retención de agua superior en un 18% en comparación a los suelos adyacentes.

De forma general, en la mayoría de los estudios, el biochar aumenta la productividad y calidad del suelo, sobre todo en suelos ácidos y pobres en nutrientes. En la revisión de Sohi y col. (2009) se muestran 13 estudios de distintos autores en los que se obtienen mejoras en la productividad en los diferentes cultivos realizados. Tres son los mecanismos propuestos que

tratan de explicar cómo el biochar permite aumentar la producción en cosechas (Sohi y col., 2009):

1. Modificación directa de la química del suelo debido a la composición del biochar.
2. Permite la modificación de la dinámica de los nutrientes en el suelo o bien cataliza reacciones útiles para la obtención de un suelo fértil debido a las superficies químicamente activas que conforman el biochar.
3. Modifica físicamente el suelo de manera que beneficia el crecimiento de las raíces y aumenta la retención de agua y nutrientes.

Se ha descubierto que el biochar permite obtener igual rendimiento de cosecha con una dosis más baja de fertilización que aquellos cultivos en los cuales se aplica la dosis óptima de fertilización (Sohi y col., 2009). Se ha sugerido que el objetivo principal de aplicación de biochar en suelos de cultivos no sería tanto para aumentar la producción, sino más bien para asegurar un equilibrio de las cosechas, frente a eventos climáticos adversos como pueden ser las sequías. Lehmann y Rondon (2006) encontraron incrementos en la absorción por plantas de P, K, Ca, Zn y Cu en cultivos tropicales en los cuales se había aplicado biochar. La naturaleza y el mecanismo que explique las interacciones entre cosecha, tipo de suelo, tipo de materia prima para la producción de biochar, método de pirólisis y dosis de aplicación tienen que ser ampliamente estudiados para tener capacidad de predicción en los resultados esperados por la aplicación de biochar en suelos, y así abrir la posibilidad de aplicación a escalas más amplias.

Por otra parte, la interacción del biochar con los fertilizantes, los efectos sobre la biota del suelo y sus implicaciones sobre la ecología del mismo, son factores todavía poco conocidos y en este sentido, la investigación de los efectos de la aplicación del biochar en suelos es reciente (Lehmann y col., 2011). Las investigaciones al respecto están enfocadas al estudio de la estructura física del biochar y las interacciones con microorganismos, como las micorrizas, presentando una gran variabilidad en los resultados. Algunos estudios han encontrado incrementos de la actividad microbiana en suelos enriquecidos con biochar (Steiner y col., 2008). Dichos estudios hacen referencia a la capacidad del biochar, debido a su rica estructura en microporos, para permitir el establecimiento de colonias microbianas.

Los microorganismos beneficiosos habitantes de la zona rizosférica, entre los que se incluyen fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fósforo, incrementadores del crecimiento, agentes de biocontrol, transportadores de nutrientes y estabilizadores del suelo, son fundamentales para mantener las producciones agrícolas. Actualmente, estos factores biológicos del suelo se han convertido en criterios de importancia para valorar la fertilidad del

suelo. Hoy en día, el concepto de “calidad del suelo” se relaciona directamente con la productividad, la salud y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Barea, 2009). Desde el punto de vista agronómico la “calidad del suelo” es expresada como “fertilidad” y define la capacidad de un suelo para soportar plantas sanas y productivas. Las interacciones entre las propiedades físicas, químicas, biológicas y climáticas del sistema son las que identifican la fertilidad de los suelos, y en este contexto, los hongos micorrícicos se consideran como componentes clave de dicha fertilidad, bien sea a través de la propia simbiosis o por su interacción con otros microorganismos de la rizosfera. El efecto del biochar sobre este tipo de hongos ha sido estudiado por diferentes autores (Lehmann y col., 2011; LeCroy y col., 2013; Hammer y col., 2014; Elzobair y col., 2015; George y col., 2012; Kelly y col., 2015; Warnock y col. 2007) habiéndose obtenido resultados confortantemente positivos, lo que invita a profundizar en este tipo de investigaciones y a abrir posibilidades en este marco de fertilidad biológica de los suelos.

#### 1.4. Biomasa de estudio

La biomasa, en su definición energética, está compuesta por toda la materia orgánica, de origen animal o vegetal, y los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Esta incluye los residuos generados por actividades agrarias, forestales y ganaderas, y los subproductos de la industria agroalimentaria y de transformación de la madera (IDEA, 2007).

En este caso, la biomasa de estudio es residual, y concretamente de tipo seco (BRS) diferenciándola del húmedo (BRH). La primera se compone de restos agrícolas, de poda o forestales; la segunda principalmente de lodos, purines o aceites, y se diferencia de otros residuos orgánicos, en que tiene un mayor contenido en agua con respecto al de materia orgánica sólida en su peso total (Sebastián y col., 2010).

La poda de sarmiento de vid, es realizada en el llamado *reposo invernal*, para limitar su crecimiento y mejorar la producción de la siguiente cosecha. Por tanto, se trata de una biomasa residual de actividad agrícola.



**Figura 5. Viñedo con restos de poda.**

En la gestión agrícola, existe la posibilidad de dejar los restos de poda en el terreno (con la intención de devolver parte de la biomasa generada por el cultivo al sistema) o de retirar estos restos junto con racimos sin cosechar y hojas caídas durante el invierno, para evitar una fuente de inóculo y que constituya un reservorio de microorganismos fitopatógenos, entre los que destacan las especies fúngicas como excoziosis, mildiu, podredumbre gris y de plagas como cochinilla harinosa de la vid (Sottile y Rovai, 2016).

En 2007, España destinaba 1,16 millones de has al cultivo de la uva. Esto la sitúa en el país con mayor extensión de viñedo de la Unión Europea y del mundo. Además, la vid ocupó el tercer lugar en extensión de los cultivos españoles, detrás de los cereales y el olivar (Lissarrague y de Toda, 2009). En el año 2013, España produjo 38,6 millones de hl de vino, sin contar zumo y mosto (MAGRAMA, 2015). En cuanto a exportaciones, España alcanzó en septiembre de 2014 el liderazgo mundial en la venta de vino en volumen (OEMV, 2014).

En este contexto que vivimos en España, los sarmientos son una interesante fuente de residuos para valorizar. Los usos actuales de éstos son variados, pueden usarse como combustibles para calefacción, carbón de brasa para barbacoa o enmienda orgánica para el suelo.

Por todo ello, se ha decidido utilizar los restos de poda de viña como fuente de biomasa para la producción de biochar, debido a su gran disponibilidad y a la posibilidad de su valorización como enmienda orgánica.



## 2. OBJETIVOS

Los beneficios que aporta la aplicación del biochar sobre el suelo son numerables, como se ha citado anteriormente. El problema reside en que se requiere mucha investigación y desarrollo para determinar las mejores prácticas de manejo para el uso del biochar en cada sistema, teniendo en consideración las características específicas de cada material de biochar (Major, 2010).

Como se ha explicado en el apartado 1.3., en función de las condiciones a las que ha sido pirolizado el biochar (temperatura, presión, ratio de temperatura, etc.) sus características varían. Por ello, se ha estudiado en este trabajo las características físico-químicas básicas y las características mecánicas del biochar de sarmiento de vid, uno realizado a 400°C y otro a 600°C de temperatura final de pirólisis, para conocer la influencia de su aplicación sobre plantas de gramíneas, mediante la puesta en marcha de un bioensayo en vivero. De esta manera, se avanza hacia el conocimiento de la influencia de cada tipo de biochar sobre el sistema suelo-planta-microorganismos. Cabe destacar el estudio sobre la caracterización mecánica del biochar, como primera investigación en esta línea.

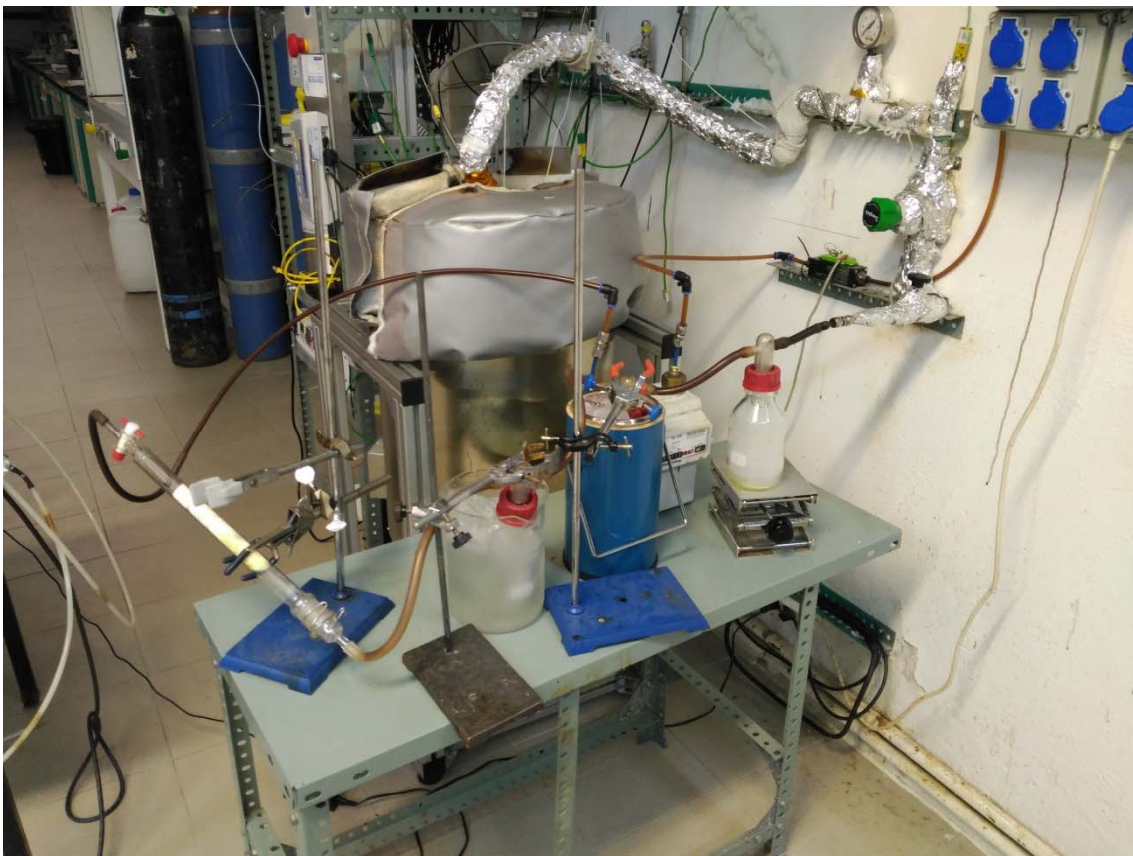
Los objetivos principales que persigue el presente proyecto son los siguientes:

1. Establecer una metodología adecuada para la producción de biochar procedente de sarmiento de viña (*Vitis vinifera*) mediante un proceso de pirólisis lenta.
2. Caracterizar física y mecánicamente el biochar y conocer su comportamiento en el momento de su aplicación sobre el suelo mediante el uso de maquinaria, simulando este proceso en laboratorio.
3. Buscar posibles correlaciones entre las propiedades físicas del biochar y sus propiedades físico-químicas básicas.
4. Realizar una estimación preliminar de la influencia del biochar en el desarrollo de plantas gramíneas poniendo a punto una metodología adecuada de cultivo bajo condiciones controladas.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Producción de biochar

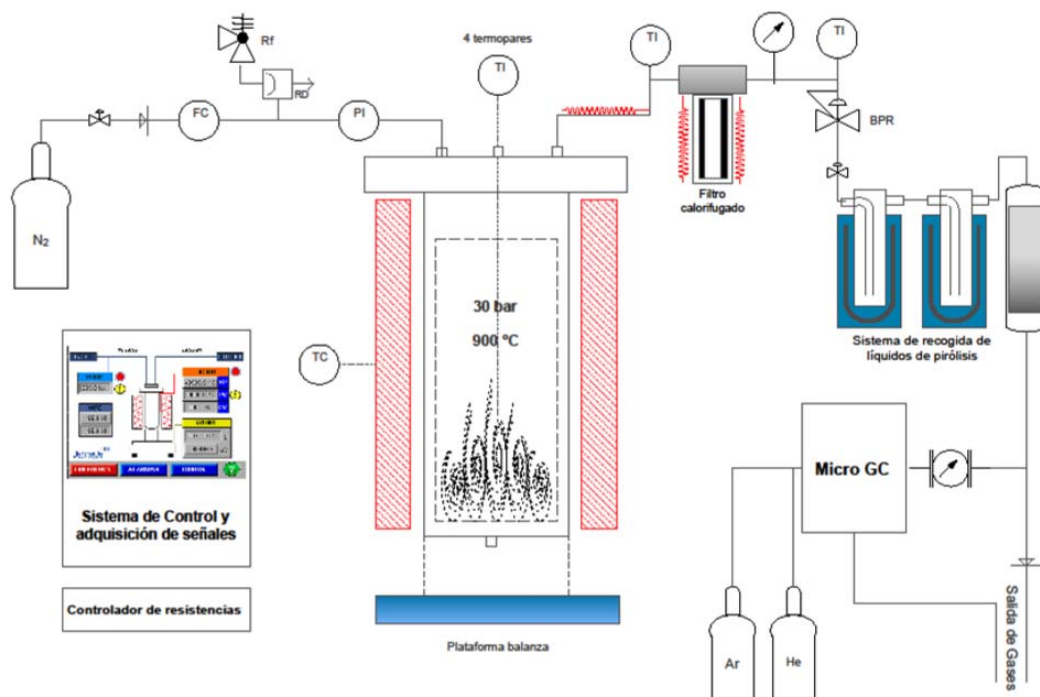
Para la producción del biochar utilizado en los bioensayos, este proyecto cuenta con un reactor de pirólisis a escala de laboratorio ubicado en el laboratorio 7 del edificio Gratal en la Escuela Politécnica Superior de Huesca (Figura 6).



**Figura 6. Reactor de pirólisis ubicado en la EPSH.**

La Figura 7 muestra un diagrama de flujo de la planta experimental capaz de operar a una presión absoluta máxima de 3,0 MPa a 700 °C. El reactor de pirólisis se compone de un cuerpo cilíndrico con fondo semiesférico construido en aleación AVESTA 253MA. El volumen del reactor es de aproximadamente 6 litros totales y cuenta con una cesta de soporte para el material a pirolizar de 4 litros de capacidad, construida en malla de aleación Monel.

El sistema de control y adquisición está basado en PLC, con interfaz táctil para actuación y supervisión directa, que permite la programación de rampa de calentamiento del horno, el control de caudal del gas inerte, y el monitoreo y adquisición de datos de temperatura, presión y variación de peso. Los vapores a la salida del reactor se llevan a un sistema de limpieza donde se separa la fracción líquida de producto, formada por agua y fracción orgánica ó bio-oil. Finalmente, los gases de pirólisis se analizan en un micro-cromatógrafo de gases equipado con dos canales en paralelo, configuración que permite la cuantificación de las especies siguientes: CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.



**Figura 7. Sistema experimental para el proceso de pirólisis en lecho fijo.**

El biochar puede producirse a través de distintos procesos termoquímicos como pirólisis lenta, pirólisis rápida, carbonización flash o gasificación (Gaunt y Lehmann, 2008; Manyà, 2012). En función del tipo de proceso realizado se producirá mayor cantidad de una fracción (char, bio-oil, gas). En la Tabla 1, puede verse un resumen de los diferentes procesos (IEA, 2007; Manyà, 2012) y el tiempo de residencia (Tr) de la biomasa a cada una de las temperaturas.

**Tabla 1. Procesos termoquímicos de pirólisis y descripción de los tiempos de residencia (Tr)**

Proceso	Condiciones	Fracción optimizada
<b>Pirólisis lenta</b>	400 – 600 °C Tr largo (> 3 min)	Sólida (char)
<b>Pirólisis rápida</b>	~500 °C Tr corto (10 – 20 s)	Líquida ( <i>bio-oil</i> )
<b>Carbonización flash</b>	~600 °C; Tr muy corto (1 s) 1 – 2 MPa	Sólida (char)
<b>Gasificación</b>	> 800 °C 1 – 2 MPa	Gas ( <i>syngas</i> )

El proceso seleccionado para optimizar la producción de biochar fue la pirólisis lenta debido a que puede llegar a transformar hasta el 50% de la materia prima en biochar. La pirólisis lenta se caracteriza por velocidades de calentamiento bajas y tiempo de residencia de la fase vapor elevados, que llevada a cabo a presión y temperatura moderadas, puede aumentar el rendimiento de la fracción de char (Antal y Grønli, 2003; Gaunt y Lehmann, 2008; Sebastián y col., 2010; Zhang y col., 2010; Manyà, 2012).

El rendimiento a char ( $Y_{char}$ ) (1) es un índice que proporciona información acerca de la cantidad de char producida respecto a la biomasa inicial, donde  $m_{char}$  corresponde a la masa seca de char obtenida tras la pirólisis, y  $m_{bio}$  a la masa de biomasa utilizada en base seca.

$$Y_{char} = \frac{m_{char}}{m_{bio}} \quad (1)$$

Se han producido dos tipos de biochar procedentes de la misma materia prima (restos de poda de viñas autóctonas, *Vitis vinifera*) bajo distintas condiciones de pirólisis: temperatura final, tiempo de residencia del gas y presión absoluta de operación, que condicionarán la estabilidad del carbono albergado en el biochar. Concretamente se ha obtenido dos tipos de biochar, uno producido a una temperatura final de 400°C y otro a una de 600°C.

Previo al proceso de pirólisis es necesaria una preparación inicial de los restos de poda de viña. Las fracciones medias han sido las seleccionadas para su pirolización, debido a que son las óptimas para este fin (Tabla 2). Éstas se cortaron en pequeños fragmentos de

aproximadamente unos 4 cm, con la ayuda de unas tijeras de podar, para su correcta colocación en la cesta de soporte o malla que se introduce en el reactor.

**Tabla 2. Usos del sarmiento de viña según fracciones.**

FRACCIÓN	DIÁMETRO	USO
Grueso	< 10 mm	Reserva
Medio	0,85 mm < < 10 mm	Pirólisis
Fino	0,42 mm < < 0,85 mm	TGA

Una vez realizada la preparación inicial del material a pirolizar, se tara la cesta y se introducen en su interior los pequeños fragmentos del proceso anterior, anotando el peso total. La cesta y la biomasa se colocan dentro del reactor, lo más recto posible sobre la base, para realizar la pirólisis.

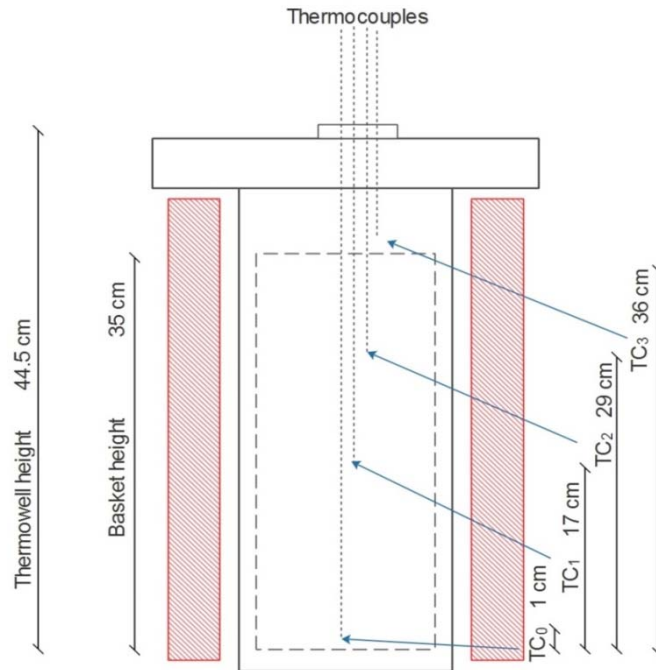
El reactor debe ser cerrado herméticamente para evitar la entrada de aire, lo que supondría una alteración en la atmósfera de pirolización. Por ello, es necesario comprobar el estado de la junta del reactor, cerrar correctamente los 8 tornillos que permiten fijar la parte superior e inferior y asegurarse de que el termopozo atraviesa correctamente el lecho de la biomasa.

El reactor se coloca en el interior del horno mediante la ayuda de un elevador, evitando el rozamiento con las paredes.



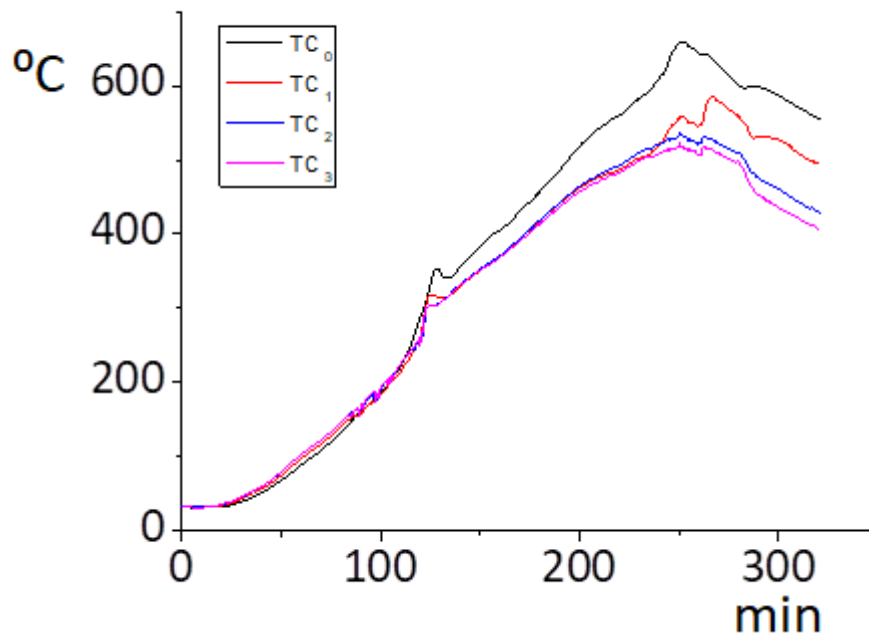
**Figura 8. Sarmiento, Cesta, reactor y horno del sistema de pirólisis.**

Una vez introducido, se conecta la entrada y salida de gas al reactor, se introducen los termopares a las alturas correspondientes (Figura 9) y se realiza una prueba de estanqueidad introduciendo un flujo constante de gas al sistema. Se coloca la camisa aislante en la parte superior del reactor, se enciende la campana extractora, se comprueba que el lector de CO funciona y se comienza con la rampa de calentamiento para empezar con el experimento.



**Figura 9. Localización de los termopares a distintas alturas. Azuara y col. (2016).**

La rampa de calentamiento (Figura 10) consiste en elevar gradualmente la temperatura hasta alcanzar la temperatura final de pirólisis. Una vez alcanzada la temperatura final elegida, se mantiene aproximadamente 1 h.



**Figura 10. Perfiles de temperatura del proceso de pirólisis del sarmiento de viña a 600 °C.**

**Fuente: Azuara y col. (2016).**

Durante todo el experimento, se realiza un control de masa y de caudal del gas cada 10 min, y una vez alcanzada la máxima temperatura, cada 5 min.

Es necesario durante el calentamiento enfriar con hielo los recipientes que albergan el circuito de vidrios por el que pasa el gas a la salida del reactor para recoger en forma de líquido la mayor cantidad posible de bio-oil, que es pesado una vez terminado el proceso.

Fui partícipe de 5 de los 13 experimentos totales de producción de biochar.

### **3.2. Caracterización química básica de la biomasa inicial y del biochar producido**

La biomasa inicial de partida (sarmiento de vid) y el biochar obtenido durante los experimentos de pirólisis se caracterizó químicamente a través de los siguientes análisis, algunos realizados en el laboratorio de la propia Escuela, y otros enviados a laboratorios externos para su análisis.

### 3.2.1. Análisis inmediato

Se realizó el análisis inmediato, tanto del sarmiento de vid como del biochar, para determinar el contenido en humedad, compuestos volátiles, carbono fijo y cenizas en el propio laboratorio. El procedimiento que se siguió, está basado en procedimientos estandarizados ASTM (D3173 para la humedad, D3174 para las cenizas y D3175 para la materia volátil), y es el siguiente:

1. Las muestras se colocan en un crisol (previamente tarado), se someten a una temperatura de 105 °C durante dos horas en estufa, y se dejan enfriar en un desecador. La pérdida de masa en esta parte se atribuye a la humedad.
2. Seguidamente las muestras se introducen en un horno de mufla a 750 °C, con el crisol tapado, durante 7 minutos. Transcurrido ese tiempo se sacan, se dejan enfriar sin destaparse en el desecador. Se pesan para determinar el contenido en materia volátil.
3. Con el crisol destapado, se introduce de nuevo en la mufla a una temperatura de 750 °C durante 90 minutos. El residuo final en cada crisol, corresponde a las cenizas y, por diferencia, se calcula el carbono fijo.

Con las siguientes fórmulas se calculan la humedad (2), los volátiles (3), las cenizas (4), y el carbono fijo (5), este último se obtiene por diferencia.

$$\% \text{ Humedad} = (m_1 - m_2) m_0 \times 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Volátiles} = (m_2 - m_3) m_0 \times 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ Cenizas} = (m_3 - m_4) m_0 \times 100 \quad (4)$$

$$\% \text{ Humedad} + \% \text{ Volátiles} + \% \text{ FC} + \% \text{ Cenizas} = 100 \quad (5)$$

Las variables que aparecen en las anteriores fórmulas son las siguientes:

$m_0$  = crisol

$m_1$  = crisol + muestra

$m_2$  = crisol + muestra sin humedad

$m_3$  = crisol + muestra sin material volátil

$m_4$  = crisol + muestra cenizas



### 3.2.2. Análisis elemental

Determinación del contenido de carbono, nitrógeno, hidrógeno total y oxígeno (este último se cuantifica por diferencia) del biochar producido. Para ello se dispone de un analizador CHN (Leco TrueSpec) en el i3A de la Universidad de Zaragoza.

### 3.2.3. Análisis fracción inorgánica

Incluye el análisis cuantitativo de los óxidos metálicos mayoritariamente presentes en la fracción inorgánica (por ejemplo;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Esta caracterización se realizó mediante XRF (Fluorescencia de Rayos X), técnica disponible en el Servicio de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Zaragoza.

### 3.2.4. Análisis químico convencional para enmiendas orgánicas

Dos muestras del biochar producido, uno de biochar a 400 °C y otro a 600 °C, se enviaron a un laboratorio externo acreditado por la ENAC para ser sometido a un análisis de nutrientes como si de un abono orgánico se tratase, y que de esa forma se analizaran los principales parámetros interesantes para su uso como enmienda agrícola. Los parámetros analizados fueron los siguientes:

- Nutrientes principales: N total, P total y K total.
- Nutrientes secundarios: Ca total, Mg total y Na total.
- Microelementos: Fe total, Cu total, Mn total y Zn total.
- Características físico-químicas: materia orgánica.
- Capacidad de retención de humedad: Capacidad de Campo y Punto de Marchitez.

### 3.3. Caracterización física y mecánica del biochar

Como caracterización novedosa, de la que no se han encontrado referencias para otros tipos de biochar, se realizó la caracterización física y mecánica del biochar que permitió cuantificar la granulometría y la resistencia a rotura de las distintas fracciones obtenidas. Posteriormente, se sometieron varias muestras de biochar (3 muestras de biochar obtenido a 400°C y 3 muestras de biochar obtenido a 600°C) a un tratamiento físico con un removedor manual diseñado en el laboratorio de maquinaria de la Escuela Politécnica, que permite simular a pequeña escala el proceso que sufre cualquier abono al ser introducido en una abonadora convencional, y de esa forma conocer su comportamiento en el momento de su aplicación sobre el suelo mediante el uso de maquinaria.

El protocolo que se siguió para las seis muestras fue el siguiente:

1. Se diferencia la fracción gruesa y fina iniciales mediante un tamiz de 2 mm y se expresa el porcentaje en peso.
2. Se toma un 10% en peso de la fracción gruesa y se caracterizan uno a uno los gránulos que lo componen (Figura 11) describiendo: masa (g), longitud (cm), volumen ( $\text{cm}^3$ ) por desplazamiento de agua en una probeta graduada y diámetro (mm).



**Figura 11. Biochar a la salida del reactor. Gránulos de biochar que suponen el 10% en peso de fracción gruesa en una de las muestras**

A partir de los datos anteriores se calcula el diámetro equivalente (mm), el factor de forma (adimensional) y la densidad (g/cm<sup>3</sup>).

$$V_{cilindro} = \pi \left( \frac{\phi_{eq}}{2} \right)^2 \times h \quad (6)$$

$$\phi_{eq} = 2 \times \sqrt{V_{cilindro} / (h \times \pi)} \quad (7)$$

$$Coeficiente\ de\ forma = \frac{\phi}{\phi_{eq}} \quad (8)$$

3. Se deja caer cada gránulo de biochar desde diferentes alturas (1, 1.10, 1.15, 1.20, 1.35, 1.50, 2 y 2.20 m) y se mide el diámetro de rotura (si existe), nº de trozos en los que rompe, masa (g) de cada trozo. Estos datos permitirán, en etapas experimentales posteriores a este proyecto, relacionar la energía potencial de rotura con las propiedades texturales de cada tipo de biochar.
4. Se realiza un procesado manual en removedor (Figura 12). Se vierte en él toda la cantidad contenida en la bolsa de un experimento y se dan 60 vueltas en aproximadamente un 1 min 30 s (40 r.p.m.).



**Figura 12.** Removedor similar a maquinaria con el biochar en su interior.

5. Una vez procesado, se separa el biochar resultante por tamaños en:
  - a. % finos (<2 mm), mediante un tamiz.
  - b. % < 2 cm
  - c. 2 cm < % < 4 cm
  - d. % > 4 cm

### 3.4. Recogida y caracterización del material edáfico para su uso en bioensayo con biochar

Para la realización de ensayos de crecimiento de plantas con biochar como enmienda orgánica, se seleccionados tipos de suelo de distinta textura, ambos con una trayectoria de gestión agroecológica. Se tomó una cantidad de suelo suficiente de la zona arable de los mismos y se separó una parte de ella para analizar las características físico-químicas en laboratorio, así como las biológicas.

#### 3.4.1. Caracterización físico-química

El análisis físico-químico de los dos tipos de suelo fue realizado por un laboratorio externo acreditado por ENAC.

Las propiedades físico-químicas analizadas para los suelos de partida fueron las siguientes:

- Nutrientes principales: P total.
- Fertilidad: pH, salinidad, materia orgánica oxidable, P disponible, K disponible y N en forma de nitratos.
- Cationes de Cambio: Mg

Textura

#### 3.4.2. Caracterización biológica

Sobre las dos muestras de suelos tomadas se realizó un análisis del número más probable (NMP) de poblaciones micorrícicas (Fisher y Yates, 1963; Schenk, 1982) y un análisis cuantitativo de algunos microorganismos, para tener información de referencia sobre el

estado de fertilidad biológica de los suelos antes de someterlos a una mezcla con sustratos inertes y biochar en el ensayo de invernadero posterior.

El NMP de propágulos micorrícicos (esporas, hifas externas y trozos de raíz colonizada) determina la capacidad de las poblaciones presentes en el suelo para generar infección micorrícica. Para su estudio, se realizaron cinco repeticiones seriadas de diluciones crecientes del suelo ( $10^0$ ,  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ) con un material inerte (perlita), donde posteriormente se cultivó una especie hospedadora de rápido crecimiento (cebada).

Se utilizaron unas bandejas de polietileno con alveolos de  $60\text{ cm}^3$  de volumen, por lo que se prepararon las diluciones de la siguiente manera:

$10^0$	1/1	$300\text{ cm}^3$ suelo
$10^{-1}$	1/10	$30\text{ cm}^3$ suelo + $270\text{ cm}^3$ perlita
$10^{-2}$	1/100	$30\text{ cm}^3$ disolución $10^{-1}$ + $270\text{ cm}^3$ perlita
$10^{-3}$	1/1000	$30\text{ cm}^3$ disolución $10^{-2}$ + $270\text{ cm}^3$ perlita
$10^{-4}$	1/10000	$30\text{ cm}^3$ disolución $10^{-3}$ + $270\text{ cm}^3$ perlita

Tras un mes de cultivo, se estudiaron las raíces, para determinar la presencia o no de la simbiosis, mediante la estimación de la colonización radical por micorrizas vesículo arbusculares (HMA) de las plantas. Las plantas se sometieron a una tinción con Azul de Tripan (Phillips y Hayman, 1970; Koske y Gemma, 1989) y posteriormente, a través de la observación al microscopio óptico se establecieron signos positivos o negativos a cada una de las muestras por alveolo, lo que permite tratar los datos con las tablas probabilísticas de Fisher y Yates (1963) y obtener el potencial micorrícico para cada suelo.



**Figura 13. Disposición de las diluciones de suelo para análisis del NMP de poblaciones micorrícicas.**

También se realizó un análisis cuantitativo de algunos microorganismos para las dos muestras de suelo en un laboratorio del Centro de Investigación y Tecnologías Agroalimentarias del Gobierno de Aragón. La toma de muestra en todos los análisis se realizó en condiciones asépticas, y se siguieron las indicaciones dictadas por la Norma ISO 6887-1:1999. Una vez seleccionadas las muestras, cada unidad analítica (25 g) se colocó en una bolsa de stomacher estéril provista de filtro de celulosa. Para los grupos microbianos estudiados se utilizó, como diluyente de la unidad analítica agua de peptona al 0,1% (Merck, Darmstadt, Alemania), y se homogeneizó en un Stomacher Lab-Blender Circulator 400 (Seward Laboratory, London, England) durante 2 minutos a 260 rpm.

En cuanto al análisis cuantitativo de microorganismos alterantes, los grupos microbianos investigados y su correspondiente norma ISO, se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3. Grupos microbianos analizados y su normativa ISO y metodología.**

GRUPO MICROBIANO	NORMATIVA ISO	MÉTODO DE SIEMBRA	MEDIO DE CULTIVO	CONDICIONES DE INCUBACIÓN
Microorganismos aerobios mesófilos totales	ISO 4833:2003	Masa 1 ml	Agar PCA (Merck)*	30 °C/ 72 h/ Aerobios
F <sup>3</sup> <i>Enterobacteriaceae</i>	ISO 21528-2:2004	Masa 1 ml	Agar VRBG (Merck)* doble capa	37 °C/ 24 h/ Aerobios
Microbiota (Mohos y Levaduras)	ISO 21527:2008	Superficie 0,1 ml	Agar DRBC (Merck)* + gentamicina 0,1%	25 °C/ 72 h/ Aerobios

\* PCA: agar de recuento en placa; CFC: cetrimida, furazina, cefaloridina; VRBG: cristal violeta, rojo neutro, bilis y glucosa; DRBC: dicloran, rosa de bengala, coranfenicol.

Estos medios de cultivo se prepararon siguiendo las indicaciones del etiquetado de los medios y de la normativa ISO 11133-1:2009. Tras autoclavar (salvo el medio VRGB), los medios de cultivo se dispensaron en placas de Petri, y se dispusieron boca abajo cubiertos con papel de filtro durante 24 horas hasta su utilización. Aquellas placas no utilizadas en el momento, se conservaron bajo refrigeración.

Además de las comunidades microbianas descritas anteriormente, se preparó un medio selectivo para hongos del género *Trichoderma*, TSM (*Trichoderma Selective Medium*) (Askew y Laing, 1993), como otro indicador de la fertilidad biológica de los suelos.

Se realizaron conteos de las placas a los 4 y 7 días desde su incubación.

### 3.5. Instalación de bioensayos en invernadero

Por último, se han iniciado dos bioensayos con plantas de gramíneas (cebada y sorgo) en uno de los invernaderos de la Escuela Politécnica Superior de Huesca, para estudiar los efectos de la adición de biochar sobre el crecimiento de algunas especies de gramíneas.

Para ambos bioensayos se utilizaron bandejas de polietileno con doce alveolos de 650 cm<sup>3</sup> de capacidad, 18 cm de profundidad y 64 cm<sup>2</sup> de superficie superior cada uno. Las bandejas fueron desinfectadas en una solución de lejía en agua al 1% antes de rellenarlas con las mezclas de sustratos.

Los dos tipos de suelo caracterizados en los apartados anteriores se procesaron en laboratorio retirando elementos gruesos y se cribaron a través de un tamiz de 2 mm de luz. Para la siembra en los contenedores, se consideró necesario mezclar cada tipo de suelo con un sustrato inerte que proporcionara aireación a la mezcla, ya que el tamizado del suelo provoca la pérdida de su estructura natural y se facilita la compactación.

Para establecer una correcta metodología de mezcla entre los dos tipos de suelo y el sustrato inerte, se realizó un ensayo preliminar en el cual se colocaron distintas macetas con una mezcla de 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de volumen de grava, de arena de cuarzo y de perlita. Dichas macetas se sembraron con cebada y se regaron a capacidad de campo evitando percolaciones. Se observó inicialmente que a porcentajes bajos de sustrato inerte la compactación era importante y que a partir del 40% la mezcla no se compactaba. Tras 45 días

de desarrollo de las plantas se comprobó finalmente que la mejor opción era la mezcla con un 50% de grava o de arena de cuarzo para ambos tipos de suelo.

En el mes de junio de 2017, tras haber completado los experimentos de biochar y haber alcanzado un volumen suficiente del mismo para realizar un bioensayo, se inició el ensayo de cebada en el invernadero.

Se plantearon los siguientes tratamientos experimentales:

1. Dos tipos de suelo; ambos de manejo ecológico, libres de productos químicos: S1 (arenoso) y S2 (arcilloso)
2. Biochar procedente de dos condiciones de pirólisis distintas: B1 (400°) y B2 (600°)
3. Dos dosis distintas de biochar, además de la dosis nula o testigo: D0, D1 (20 T/ha) y D2 (40 T/ha).

Estas dosis de biochar se decidieron tras consultar varias experiencias de ensayos a gran escala en diferentes fuentes bibliográficas.

**Tabla 4. Relación de tratamientos en los bioensayos**

<b>Dosis y Tipo de Biochar</b>	<b>Suelo 1</b>	<b>Suelo 2</b>
<b>D0 – Sin biochar</b>	S1D0	S2D0
<b>B1D1</b>	S1B1D1	S2B1D1
<b>B1D2</b>	S1B1D2	S2B1D2
<b>B2D1</b>	S1B2D1	S2B2D1
<b>B2D2</b>	S1B2D2	S2B2D2

El número de réplicas para cada combinación de factores fueron cinco y, por lo tanto, se dispusieron un total de 50 contenedores.



Conociendo los datos de las dosis de biochar a aplicar por hectárea, y teniendo en cuenta una profundidad de suelo de cultivo de 0,30 m se calcularon los gramos de biochar a aplicar por volumen de cada contenedor de cultivo (Tabla 5).

**Tabla 5. Cantidad de biochar a aplicar por volumen de cada alveolo.**

<b>Dosis Biochar (Tm/ha)</b>	<b>Volumen macetero (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa (g) de biochar en cada maceta</b>	<b>Masa biochar total necesario para cada tipo de T<sup>a</sup> de producción (g)</b>
20	650	4,34	130,1
40		8,67	

Por lo tanto cada alveolo de la bandeja se rellenó con una mezcla formada por 50% de suelo cribado, 50% de arena de cuarzo esterilizada en autoclave y la cantidad correspondiente de cada tipo de biochar para cada uno de los tratamientos.

La cebada seleccionada para el ensayo fue la variedad Shakira, por facilidad de adquisición y por tratarse de una variedad de primavera, algo muy importante al plantear un ensayo con cebada en verano, ya que las variedades de verano no necesitan horas de frío para romper su letargo.

Las semillas de cebada previa desinfección, fueron pre-germinadas en placas de Petri durante 24-48 horas. Una vez realizado, se colocaron 5 semillas por cada macetero para, una vez comprobado el arraigo, dejar únicamente la más vigorosa.

Una vez instalado el ensayo se controló la fecha de germinación completa de las plantas, observando de manera visual durante varios días tras la siembra, hasta obtener los datos finales de germinación. Se tomaron datos de longitud de la primera hoja emergida en cada plántula.



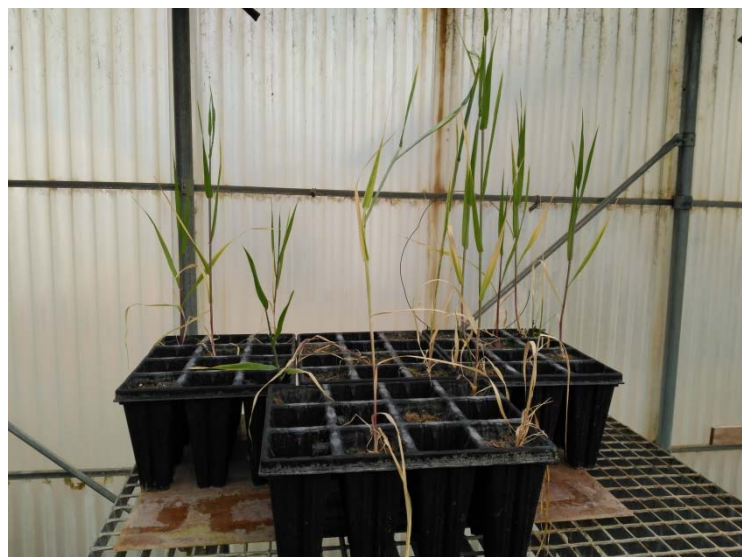
**Figura 14. Germinación de las plantas de cebada (*Hordeum vulgare*).**

El vigor de las plantas cultivadas se midió en dos ocasiones, midiendo la longitud de la primera hoja en todas las planta, a las dos semanas desde la siembra y a las tres semanas desde la siembra.

Se realizó un muestreo de raíces en cada una de las plantas, mediante una barrena de caña cilíndrica de 13 mm de diámetro y 30 cm de longitud.

Se realizó la estimación del porcentaje de colonización radical por HMA de las plantas, mediante la tinción de raíces con Azul de Tripán (Phillips y Hayman, 1970; Koske y Gemma, 1989) y su posterior evaluación mediante la técnica de intersección de campos en placa (Brundett y col., 1996).

Al cabo de tres semanas, un número elevado de plantas de todos los tratamientos empezaron a mostrar síntomas de marchitez, mostrando tonos rojizos en la base del tallo que finalmente se estrechó hasta partirse gran número de las plantas.



**Figura 15. Plantas desarrolladas del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*)**

El número de plantas en algunos de los tratamientos quedó por debajo de tres, por lo que se mantuvo el ensayo para observar el desarrollo de las plantas pero sin poder realizar comparativas de un número adecuado de repeticiones.

Tras revisar las condiciones de riego (que para la cebada fue automático en verano), la compactación de los alveolos, así como los niveles de nutrientes nuevamente para los suelos, se planteó un nuevo ensayo, esta vez con plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.)

La metodología seguida en la instalación de este ensayo fue la misma que en el de cebada con dos excepciones, las dosis de biochar y el sustrato inerte utilizado.

Con la orientación que nos dió el ensayo de cebada, en el que no vimos diferencias aparentes en el crecimiento de las plantas, se decidió plantear el cálculo de las dosis de biochar por superficie superior de alveolo en lugar de hacerlo en volumen.

**Tabla 6. Cantidad de biochar a aplicar por superficie de cada macetero.**

Dosis Biochar (Tm/ha)	Superficie macetero (cm <sup>2</sup> )	Masa (g) de biochar en cada maceta	Masa biochar total necesario para cada tipo de T <sup>a</sup> de producción (g)
20	64	12,8	384
40		25,6	

El sustrato inerte elegido para este ensayo fue grava de entre 3-6 mm de tamaño, que se desinfectó en autoclave antes de ser mezclada con los suelos cribados.

En la Figura 16 se puede observar la nascencia de las plantas de sorgo de este último ensayo, en la fecha de entrega de este trabajo.



Figura 16. Situación del bioensayo de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) al finalizar el presente proyecto.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se exponen los resultados más significativos de cada parte, todos ellos obtenidos con la metodología expuesta en el apartado 3.

### 4.1. Producción del biochar

En relación a la producción de biochar, se completaron un total de seis experimentos, en tres de ellos se produjo biochar a 400°C y en tres a 600°C.

En la Tabla 7 aparecen las masas de la biomasa inicial (restos de poda de viña) pirolizados y la masa de biochar obtenidas tras los experimentos, diferenciando cada una por su temperatura final de pirólisis (400 °C o 600°C). En la última columna aparecen los resultados del rendimiento a char ( $Y_{char}$ ), calculados mediante la ecuación (1) del apartado 3.1.

**Tabla 7. Resultados de cada experimento de producción del biochar.**

EXPERIMENTO	TEMPERATURA PIRÓLISIS (°C)	MASA BIOMASA (g)	MASA BIOCHAR (g)	RENDIMIENTO ( $Y_{char}$ )
1	600	433,34	129,98	0,30
2	600	441,68	131,42	0,30
3	600	439,65	131,23	0,30
4	400	458,66	183,69	0,40
5	400	475,15	191,09	0,40
6	400	551,69	201,16	0,37
	TOTAL	2.800,17	968,57	

El rendimiento medio obtenido para los experimentos con temperatura final de 400 °C ha sido de 0,39 y para 600 °C de 0,30. Luego, se puede concluir que existen ligeras diferencias en

el rendimiento en función de la temperatura de pirólisis. Esta diferencia es lógica, ya que a 400 °C, la descomposición térmica de la lignina aún no es completa.

#### 4.2. Caracterización química básica de la biomasa inicial y biochar producido

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la caracterización química básica de la biomasa inicial y del biochar producido. Con estos resultados se analizan las diferencias químicas que se producen en el material de estudio durante el proceso de pirólisis y las diferencias entre los dos tipos de biochar producidos.

##### 4.2.1. Biomasa inicial

Los resultados obtenidos del análisis inmediato realizado sobre la biomasa inicial se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8. Resultados del análisis inmediato del sarmiento de vid en porcentaje en masa.**

		% Volátil	% Humedad	% Cenizas	% Carbón fijo
Sarmiento	Promedio	72,93	10,47	2,46	14,14
	Desv. Est.	1,64	0,13	0,38	1,14

Los resultados obtenidos del análisis elemental realizado sobre la biomasa inicial se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9. Resultados del análisis elemental del sarmiento de vid en porcentaje en masa.**

ELEMENTOS		% EN MASA
C	Media	42,29
	Desv. Est.	0,49
H	Media	5,24
	Desv. Est.	0,06
N	Media	13,52
	Desv. Est.	0,36
O	Media	38,96
	Desv. Est.	0,45

Los resultados obtenidos del análisis de la fracción inorgánica realizado sobre la biomasa inicial se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10. Resultados del análisis de la fracción inorgánica del sarmiento de vid en porcentaje en masa**

ELEMENTOS	% EN MASA
Ca	41,68 ± 0,18
K	15,28 ± 0,16
Mg	4,02 ± 0,08
Si	2,68 ± 0,05
Fe	2,45 ± 0,06
Al	1,36 ± 0,04
P <sub>x</sub>	0,540 ± 0,024
S	0,601 ± 0,030
Mn	0,412 ± 0,021
Cl	0,475 ± 0,024



#### 4.2.2. Biochar producido

Los resultados obtenidos del análisis inmediato realizado sobre el biochar producido se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11. Resultados del análisis inmediato del biochar en porcentaje en masa.**

Biochar		% Volátil	% Humedad	% Cenizas	% Carbono fijo
400 °C	Promedio	22,03	0,57	6,45	70,88
	Desv. Est.	0,01	0,22	0,14	0,53
600 °C	Promedio	2,39	3,05	10,02	84,54
	Desv. Est.	0,71	0,34	0,81	1,32

La información más significativa que se puede observar según estos resultados es la siguiente:

- El biochar pirolizado a una temperatura final de 400 °C tiene un mayor porcentaje de compuestos volátiles que a 600 °C.
- El biochar a 600 °C tiene aproximadamente un 4% de cenizas en masa más que el producido a 400°C. Esto supondrá una mayor pérdida de biomasa durante su aplicación.
- El biochar a 600 °C consta de un mayor porcentaje de carbono fijo. Esto significa mayor estabilidad, pudiendo ser almacenado en el suelo por más tiempo, mejorando el crecimiento de las plantas y suponiendo un secuestro de carbono.
- Los cambios producidos en la biomasa inicial después del proceso de pirólisis es, principalmente, el aumento de % de carbono fijo, lo que le permite una mayor estabilidad. También se observa, por lo tanto, una pérdida en el porcentaje de material volátil.

Los resultados del análisis elemental del biochar producido se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12. Resultados del análisis elemental del biochar en porcentaje en masa.**

ELEMENTOS		BIOCHAR 400 °C	BIOCHAR 600 °C
		% EN MASA	% EN MASA
C	Media	71,54	82,89
	Desv. Est.	0,48	0,33
H	Media	4,46	1,96
	Desv. Est.	0,19	0,08
N	Media	1,576	1,52
	Desv. Est.	0,10	0,02
O	Media	22,42	13,63
	Desv. Est.	0,77	0,31

De estos resultados cabe destacar, al igual que en el análisis inmediato, el mayor contenido en carbono del biochar producido a 600 °C, y el aumento en el porcentaje del contenido de carbono del biochar producido con respecto a la masa inicial.

En la Tabla 13 aparecen los resultados del análisis de las características del biochar realizado por el laboratorio externo. Este análisis ha sido llevado a cabo sobre dos muestras.

En los documentos se presentan las determinaciones realizadas y para cada una de ellas el método realizado, la unidad, resultado e incertidumbre de este.

**Tabla 13. Resultados de cada determinación por tipo de biochar realizado por laboratorio externo.**

DETERMINACIONES		BIOCHAR 400 °C	BIOCHAR 600 °C
Nitrógeno Total		1,4 ± 0,04 % p/p	1,2 ± 0,04 % p/p
Fósforo Total		2,08 % p/p	2,45 % p/p
Potasio total		1,7 % p/p	2,1 % p/p
Calcio Total		2,9 % p/p	3,8 % p/p
Magnesio Total		0,68 % p/p	0,79 % p/p
Sodio Total		850 mg/kg	540 mg/kg
Hierro Total		280 mg/kg	210 mg/kg
Cobre Total		43 mg/kg	38 mg/kg
Magnesio Total		100 mg/kg	102 mg/kg
Cinc Total		145 mg/kg	135 mg/kg
Materia Orgánica		86,4 % p/p	85,4 % p/p
Humedad	Capacidad Campo	57,24 % p/p	60,02 % p/p
	Punto Marchitez	43,08 % p/p	41,67 % p/p

En base a estos resultados, se considera el biochar producido a 600°C ligeramente superior en cuanto a niveles nutricionales para los cultivos que el producido a 400°C.

#### **4.3. Características físicas y mecánicas del biochar**

La totalidad de los resultados obtenidos en la medición de parámetros físicos y mecánicos de las muestras de cada tipo de biochar se pueden observar en los Anexos I, II, III, IV, V y VI.

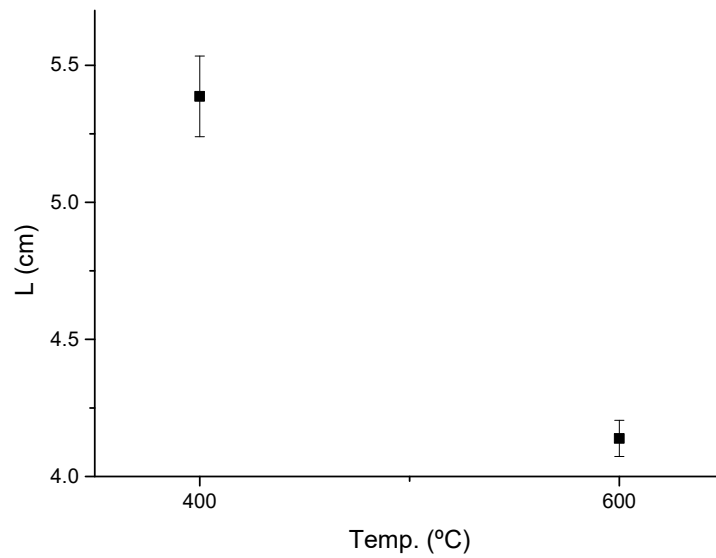
Los resultados promedios de longitud, masa, volumen, diámetro, coeficiente de forma y densidad de las muestras de biochar, se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14. Resultados promedios de longitud, masa, volumen, diámetro, coef, forma y densidad de las muestras de biochar.**

MUESTRA	LONGITUD (cm)	MASA (g)	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Φ (mm)	COEF. FORMA (φ/φeq)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
1 biochar 400 °C	6,80	0,46	1,50	4,33	0,84	0,32
2 biochar 400 °C	6,07	0,42	1,16	4,30	0,89	0,35
3 biochar 400 °C	4,16	0,29	0,88	4,47	0,89	0,33
1 biochar 600 °C	4,29	0,28	0,81	4,38	0,91	0,36
2 biochar 600 °C	4,05	0,29	0,78	4,66	0,97	0,38
3 biochar 600 °C	4,08	0,31	0,72	4,47	0,98	0,46

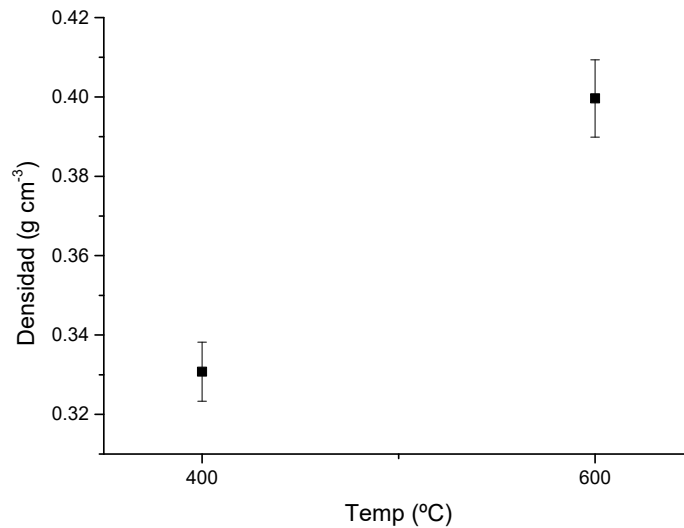
Se realizaron pruebas de normalidad para los parámetros “longitud de gránulo”, “densidad de gránulo” y “factor de forma”. Los resultados del test de Shappiro-Wilk para todas las variables fueron negativos y no superaron la prueba de normalidad. Sin embargo, este hecho no es crítico a la hora de analizar test de hipótesis de medias, como, por ejemplo; el test t-Student, ya que la cantidad total de repeticiones es muy elevada (aprox. 60 por muestra). Por lo tanto, se llevó a cabo el test t-student de muestras independientes para analizar la diferencia de las medias en función de la temperatura de producción del biochar. Los resultados para cada variable se muestran en las tablas

Con respecto al parámetro longitud se observan diferencias en las medias para cada tipo de biochar (Figura 17).



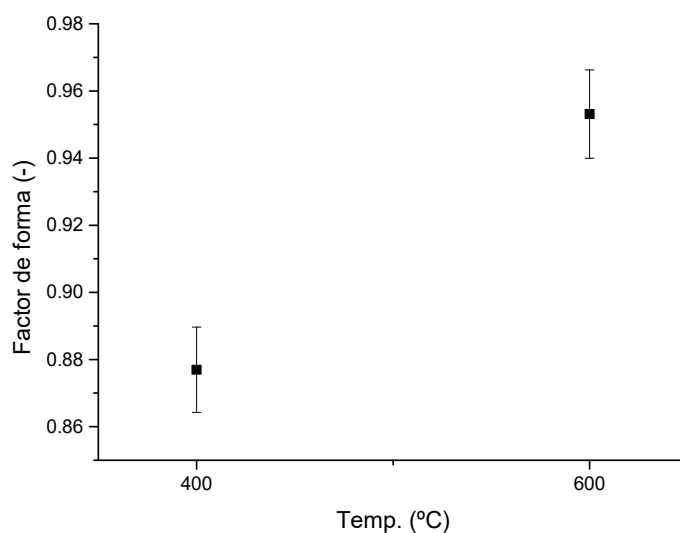
**Figura 17. Media y error estándar de la media (SEM) del parámetro longitud para cada tipo de biochar (test t-Student con p-valor =  $3,31 \cdot 10^{-13}$ )**

El parámetro densidad presenta diferencias en las medias para cada tipo de biochar (Figura 18).



**Figura 18. Media y error estándar de la media (SEM) del factor densidad para cada tipo de biochar (test t-Student con p-valor =  $4,04 \cdot 10^{-8}$ )**

El factor forma ( $\phi/\phi_{eq}$ ) presenta también diferencias en las medias para cada tipo de biochar (Figura 19).



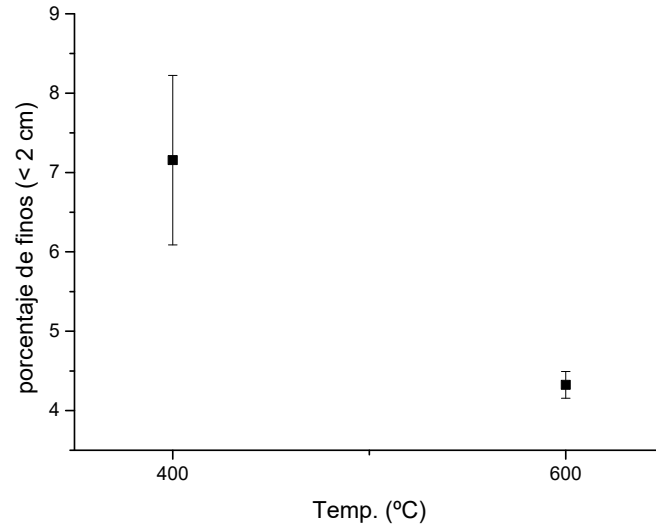
**Figura 19. Media y desviación estándar del factor forma para cada tipo de biochar (test t-Student con p-valor =  $3,95 \cdot 10^{-5}$ )**

Los resultados según la distribución de tamaño de las partículas de antes y después de la molienda, se encuentran en la Tabla 15.

**Tabla 15. Resultados de fracciones finas y gruesas del biochar antes y después del procesado mecánico.**

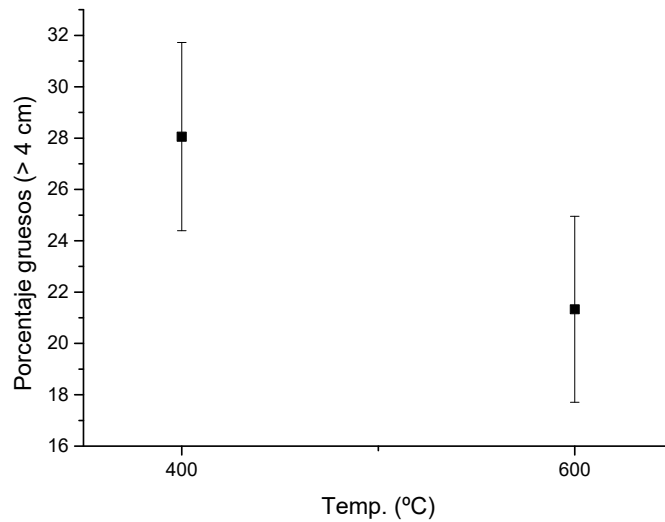
	ANTES DE PROCESADO						DESPUÉS PROCESADO					
	M1B1	M2B1	M3B1	M1B2	M2B2	M3B2	M1B1	M2B1	M3B1	M1B2	M2B2	M3B2
FINOS : < 2 mm (g)	4,4	7,6	9,4	7,6	6,2	6,2	12,45	15,3	14,4	6,9	8	7,56
GRUESO: > 2 mm (g)	204,2	190,4	217,8	169,3	178,9	178,9	186,4	168,2	195,3	156,3	169	171,3

Las diferencias en granulometría después del procesado mecánico se representan gráficamente en las Figura 20 y Figura 21, donde las gráficas representan los % medios y la desviación estándar.



**Figura 20. Porcentaje de tamaño de partícula fino por tipos de biochar.**

Se observa como para el biochar producido a 400°C, el porcentaje de finos después de haber sido procesado en el removedor es muy superior al que se genera en el biochar producido a 600°C.



**Figura 21. Porcentaje de tamaño de partícula gruesos por tipos de biochar.**

#### 4.4. Características material edáfico

##### 4.4.1. Caracterización físico-química

En la Tabla 18 aparecen los resultados del análisis de las características del material edáfico mezclado con gravilla realizado por el laboratorio externo acreditado por la ENAC.

El análisis ha sido llevado a cabo sobre dos muestras, cuyos nombres dados en las referencias de los documentos son S1D0 para el tipo de suelo más arenoso y S2D0 para el más arcilloso. Estas muestras fueron previamente mezcladas al 50% con gravilla para obtener, de este modo, las características del suelo real sobre el que se va a realizar el bioensayo.

En los documentos se presentan las determinaciones realizadas y para cada una de ellas el método utilizado, la unidad, resultado e incertidumbre de éste.



**Tabla 16. Resultados de cada determinación por tipo de suelo.**

DETERMINACIONES		SUELO S1		SUELO S2	
Humedad	Capacidad Campo	9,94 % p/p		17,05 % p/p	
	Punto Marchitez	4,53 % p/p		6,83 % p/p	
pH		8 ± 0,5		8,2 ± 0,5	
Conductividad eléctrica		0,4 ± 0,06 dS/m		0,2 ± 0,03 dS/m	
Materia orgánica oxidable		2,81 ± 0,35 g/100g		1,74 ± 0,22 g/100g	
Fósforo total	Fósforo Olsen	Inferior LC	29 ± 3 mg/kg	Inferior LC	17 ± 1,5 mg/kg
Potasio		254 ± 43 mg/kg		130 ± 22 mg/kg	
Magnesio		124 ± 26 mg/kg		194 ± 40 mg/kg	
Clase textural		Franco-arenoso		Franco-arcilloso	

Estos documentos (aportan como datos relevantes la clase textural de cada material edáfico, confirmándonos de que el suelo S1 es de tipo franco-arenoso y el S2 franco-arcilloso.

#### 4.4.2. Caracterización biológica

Para el análisis del NMP de propágulos micorrícicos, se han obtenido los siguientes resultados, en base a las tablas probabilísticas de Fisher y Yates (1963) (Tabla 19):

**Tabla 17. Resultados del NMP de propágulos micorrícicos**

Tipo de suelo	Número de positivos	Número de negativos	$\lambda$	Potencial Micorrícico (nº propágulos/cm <sup>3</sup> )
S1 (E)	9	16	1,4	0,2
S2 (F)	14	11	114	2

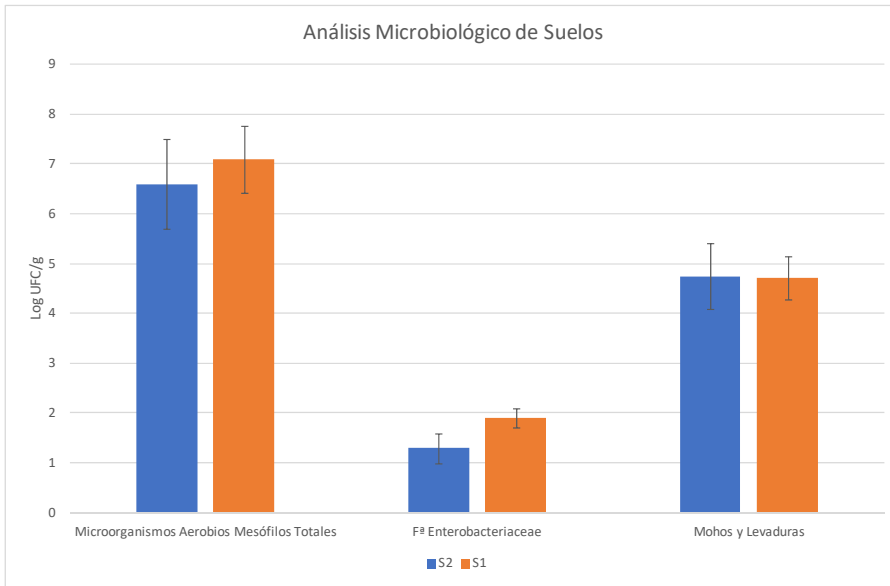
En base a los resultados obtenidos, se puede tener en cuenta que el suelo F (S2) tiene un potencial micorrícico diez veces mayor que el suelo E (S1).

En la Figura 22 se pueden observar los resultados finales del ensayo sobre NMP de propágulos micorrícicos realizado en placas de Petri.



**Figura 22. Algunas de las placas de Petri sembradas.**

Los resultados obtenidos del análisis microbiológico de los suelos se han representado en la Figura 23. Se observan similitudes en los niveles para las tres comunidades microbianas analizadas, además se detectó presencia de *Trichoderma harzianum* en los dos tipos de suelo.



**Figura 23. Resultado análisis microbiano de las muestras de suelo.**

#### 4.5. Bioensayos: resultados preliminares de la influencia del biochar

Como se ha comentado en metodología, las condiciones de instalación del primer ensayo de cebada no fueron las adecuadas, ni por la mezcla de sustrato seleccionada (a pesar de haberla testeado previamente), ni por los aportes de agua que recibieron las plantas, lo que provocó la pérdida de un gran número de plantas dejando sin suficientes repeticiones varios de los tratamientos del ensayo.

En la Figura 24 se pueden observar los tallos rojizos de las plantas de cebada (*Hordeum vulgare*).



**Figura 24. Tallos rojizos de las plantas de cebada (*Hordeum vulgare*).**

Esto se produjo una vez realizadas las primeras mediciones de nascencia y longitud de planta (cm) en semana 2 y semana 3 (Tabla 20).

**Tabla 18. Resultados promedios de las mediciones de crecimiento de cebada por muestras y semana.**

MUESTRA	LONGITUD PROMEDIO SEMANA 2 (cm)	LONGITUD PROMEDIO SEMANA 3 (cm)
S1D0	4,82	10,34
S2D0	5,14	10,2
S1B1D1	4,86	10,56
S2B1D1	4,74	10,94
S1B1D2	5,08	11,14
S2B1D2	4,22	10,1
S1B2D1	4,88	10,96
S2B2D1	5,1	10,82
S1B2D2	4,74	10,51
S2B2D2	4,92	10,7

Sobre el grado de micorrización de las plantas de cebada, cabe decir que se observaron niveles medios de micorrización en todos los tratamientos, ligeramente mayores en el suelo S2, pero no se ha considerado apropiado tenerlos en cuenta ya que la longitud de las raíces teñidas y analizadas para cada una de las plantas no llegaba a longitudes de 30 cm, valor que se suele considerar como mínimo en el estudio de raíces de plantas en conteos de porcentajes de micorrización.

En las siguientes tablas (Tabla 21, Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24) se presentan los resultados estadísticos (análisis ANOVA de dos factores) de los resultados obtenidos en el bioensayo. El factor A hace referencia a las muestras sin biochar, con biochar 1 y con biochar 2. El factor B hace referencia a las dosis 1 y dosis 2. Mediante el ANOVA se estudia el efecto principal de cada factor, así como la significancia del término de interacción entre factores.

Estas mediciones no presentan diferencias significativas entre las muestras que contienen biochar y las que no.

Tabla 19. Análisis estadístico de resultados semana 2 y suelo 1.

SEMANA 2 ; SUELO 1					
FACTOR A					
	N	Media	Desv. Est.	EEM	VARIANZA
NO BC	10	4,82	1,18	0,37	1,40
BC 1	10	4,97	0,82	0,26	0,68
BC 2	10	4,81	1,11	0,35	1,23
FACTOR B					
	N	Media	Desv. Est.	EEM	VARIANZA
DOSIS 1	15	4,85	1,04	0,27	1,08
DOSIS 2	15	4,88	1,03	0,27	1,06
ANOVA					
	GL	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Valor de F	p-valor
FACTOR A	2	0,16	0,08	0,07	<b>0,94</b>
FACTOR B	1	0,005	0,005	0,004	<b>0,95</b>
INTERACTION	2	0,17	0,08	0,07	<b>0,94</b>
MODEL	5	0,33	0,07	0,05	<b>0,99</b>
ERROR	24	29,616	1,23	-	-
CORRECTED TOTAL	29	29,95	-	-	-

Tabla 20. Análisis estadístico de resultados semana 2 y suelo 2.

SEMANA 2 ; SUELO 2					
FACTOR A					
	N	Media	Desv. Est.	EEM	VARIANZA
NO BC	10	5,14	1,34	0,43	1,81
BC 1	10	4,48	0,60	0,19	0,36
BC 2	10	5,01	0,74	0,24	0,55
FACTOR B					
	N	Media	Desv. Est.	EEM	VARIANZA
DOSIS 1	15	4,99	0,92	0,24	0,84
DOSIS 2	15	4,76	1,03	0,27	1,06
ANOVA					
	GL	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Valor de F	p-valor
FACTOR A	2	2,45	1,22	1,24	<b>0,31</b>
FACTOR B	1	0,41	0,41	0,41	<b>0,53</b>
INTERACTION	2	0,35	0,17	0,18	<b>0,84</b>
MODEL	5	3,20	0,64	0,65	<b>0,67</b>
ERROR	24	23,73	0,99	-	-
CORRECTED TOTAL	29	26,93	-	-	-

**Tabla 21. Análisis estadístico de resultados semana 3 y suelo 1.**

SEMANA 3 ; SUELO 1					
FACTOR A					
	N	Media	Desv. Est.	EEM	VARIANZA
NO BC	10	10,34	1,26	0,40	1,59
BC 1	10	10,85	0,93	0,29	0,86
BC 2	10	10,73	1,11	0,35	1,24
FACTOR B					
	N	Media	Desv. Est.	EEM	VARIANZA
DOSIS 1	15	10,62	1,18	0,30	1,38
DOSIS 2	15	10,66	1,05	0,27	1,09
ANOVA					
	GL	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Valor de F	p-valor
FACTOR A	2	1,43	0,72	0,54	<b>0,59</b>
FACTOR B	1	0,01	0,01	0,01	<b>0,92</b>
INTERACTION	2	1,34	0,67	0,50	<b>0,61</b>
MODEL	5	2,78	0,56	0,42	<b>0,83</b>
ERROR	24	31,86	1,33	-	-
CORRECTED TOTAL	29	34,64	-	-	-

Tabla 22. Análisis estadístico de resultados semana 3 y suelo 2.

SEMANA 3 ; SUELO 2					
FACTOR A					
	N	Media	Desv. Est.	EEM	VARIANZA
NO BC	10	10,2	2,51	0,79	6,28
BC 1	10	10,52	1,73	0,55	2,99
BC 2	10	10,76	1,00	0,32	1,00
FACTOR B					
	N	Media	Desv. Est.	EEM	VARIANZA
DOSIS 1	15	10,65	1,72	0,45	2,97
DOSIS 2	15	10,33	1,92	0,50	3,70
ANOVA					
	GL	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Valor de F	p-valor
FACTOR A	2	1,58	0,79	0,21	<b>0,81</b>
FACTOR B	1	0,77	0,77	0,20	<b>0,66</b>
INTERACTION	2	1,03	0,52	0,14	<b>0,87</b>
MODEL	5	3,38	0,68	0,18	<b>0,97</b>
ERROR	24	90,7	3,78	-	-
CORRECTED TOTAL	29	94,08	-	-	-



Con respecto al cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L.), se realizó su correcta instalación en el invernadero (Figura 25), y hasta la fecha se ha podido constatar el arraigo de todas las semillas pregerminadas sembradas.



**Figura 25. Realizando la instalación del bioensayo de sorgo (*Sorghum bicolor* L.).**

## 5. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden establecer las siguientes conclusiones para el biochar obtenido a partir de sarmiento de viña y para las dos temperaturas estudiadas:

1. La temperatura de pirólisis en la producción del biochar influye sobre parámetros físicos de los gránulos obtenidos: longitud, densidad y factor de forma.

2. La temperatura de pirólisis en la producción del biochar influye sobre el porcentaje de partículas finas que se generan en la aplicación del biochar a gran escala.

3. El proceso de pirólisis en la producción del biochar produce un incremento en el porcentaje de carbono fijo contenido en la biomasa. Este incremento se produce en mayor medida en el biochar de 600 °C.

4. Las dosis aplicadas tanto en volumen como en superficie de contenedor, no han provocado efectos fitotóxicos ni impedido el arraigo de plantas de cebada o de sorgo en condiciones controladas.

5. Las dosis de biochar aplicadas por volumen de contenedor no han tenido una influencia significativa en el crecimiento de plantas de cebada durante tres semanas de ensayo experimental.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

ADÔNIS, M., WENCESLAU GERALDES, T.; GILVAN COIMBRA, M. (2009). Extratores e disponibilidade de micronutrientes em Terra Preta de Índio da Amazônia Central Extractants and availability of micronutrients in Central Amazonian dark earth soil. *Ciencia Del Suelo* , 27:p 127-134.

ANTAL, M. J.; ALLEN, S. G.; DAI, X.; SHIMIZU, B.; TAM, M. S.; GRØNLI, M. (2000). Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. *Industrial & engineering chemistry research*, 39(11): 4024-4031.

ANTAL, M. J.; GRONLI, M. (2003). The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 42(8): 1619-1640.

ASKEW, D.J.; LAING, M.D.(1993). An adapted selective medium for the quantitative isolation of *Trichoderma* species. *Plant Pathology*, 42: 686-690.

AZUARA, M.; SÁIZ, E.; MANSO, J.A.; GARCÍA-RAMOS, F.J.; MANYÀ, J.J. (2017). Study on the effects of using a carbon dioxide atmosphere on the properties of vine shoots-derived biochar. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 124: 719–725.

BALDOCK, J.; SMERNIK, R.J. (2002). Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Org. Geochem.* 33: 1093-1109.

BAREA, J.M. (2009). Mycorrhizas and agricultural fertility. *Current Topics in Agriculture*. Editorial Studium Press. USA.

BRUNDETT, M.; BOUGHER, N.; DELL, B.; GROVE, T; MALAJEZUK, N. (1996). Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture. *ACIAR monograph*, 32: 374 pp.

CHAN, K.Y.; XU, Z. (2009). Biochar : nutrient properties and their enhancement. En: Lehmann, J.; Joseph, S. (Eds). *Biochar for Environmental Management : Science and Technology*. Earthscan, London, UK, 67-84.

DAY, D.; EVANS, R.J.; LEE, J.W.; REICOSKY, D. (2005). Economical CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, and NO<sub>x</sub> capture from fossil-fuel utilization with combined renewable hydrogen production and large-scale carbon sequestration. *Energy*, 30: 2558-2579.

DERMIBAS, A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *J. Anal. App. Pyrol.* 72: 243-48.

ELZOBAIR, K.A.; STROMBERGER, M.E.; IPPOLITO, J.A.; LENTZ, R. (2015). Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. *Chemosphere*. Article in press. [En línea] [Consultado el 10/10/2017]. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/chemosphere](http://www.elsevier.com/locate/chemosphere)

ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J. (2012). Biochar : Carbon Sequestration, Land Remediation and Impacts on Soil Microbiology. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.* 42: 644-653.

ENNIS, C.J.; EVANS, A.G.; ISLAM, M.; RALEBITSO-SENIOR, T.K.; SENIOR, E. (2012). Biochar : carbon sequestration, Land remediation and Impacts on Soil Microbiology. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.* 42: 2311-2364.

FISHER, R.A.; YATES, F. (1963). *Statistical table of biological, agricultural and medical research*. Ed. Oliver and Boyd. Edimburgo.

FiBL. (2007). *Organic farming and Climate Change*. Monograph. Research Institute of Organic Agriculture. International Trade Center UNCTAD/WTO. 27 pp. MDS-08-153-E.

FOWLES, M. (2007). Black Carbon Sequestration as an Alternative to Bioenergy. *Biomass Bioenergy* 31(6): 426-432

GARCÍA, C.; ROSAS, J.G.; SÁNCHEZ, M.E.; PASCUAL, J.A.; HERNÁNDEZ, M.T. (2014). De residuo a recurso: El camino hacia la sostenibilidad. Tomo III: Recursos orgánicos. Aspectos agronómicos y medioambientales. Cap.8: Enmiendas orgánicas de nueva generación: Biochar y otras biomoléculas. 182 pp. Mundi-Prensa. Madrid.

GAUNT, J. L.; LEHMANN, J. (2008). Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. *Environmental Science & Technology*, 42(11): 4152-4158.

GEORGE, C.; WAGNER, M.; KÜCKE, M.; RILLING, M.C. (2012). Divergence consequences of hydrochar y plant-soil system : Arbuscular mycorrhiza, nodulation, plant growth and soil aggregation effects. *Applied Soil Ecology*, 59: 68-72.

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. (2000). Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Org. Geochem.*, 31: 669-678.

HAMMER, E.C.; BALOGH-BRUNSTAD, Z.; JAKOBSEN, I.; OLSSON, P.A.; STRIPP, S.L.S.; RILLING, M.C. (2014). A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. *Soil Biology and Biochemistry*, 77: 252-260.

IBI (International Biochar Initiative). [En línea]. [Fecha de consulta: 12 de septiembre de 2017]. Disponible en: <http://www.biochar-international.org/biochar/carbon>

IDAE. (2007). Biomasa: Maquinaria Agrícola y forestal. Gobierno de España. Madrid

IEA, International Energy Agency (2007). Biomass Pyrolysis. IEA Bioenergy publications.

KELLY, C.N.; CALDERÓN, F.C.; ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; MIKHA, M.M.; BENJAMIN, J.; RUTHERFORD, D. W.; ROSTAD, C.E. (2015). Switchgrass Biochar effects on plant biomass and microbial dynamics in two soils from different regions. *Pedosphere*, 25(3): 329-342.

KERN, D.C.; N KÄMPF. (1989). Antiguos asentamientos indígenas en la formación de suelos con tierra negra arqueológica en la región de Oriximiná, Pará. *R. Bras. Cielo Solo*, 13: 219-225.

KUPPUSAMY, S.; THAVAMANI, P.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R. (2016). Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: current knowledge and future research directions. *Environment International*, 1.

KOSKE, R.E.; GEMMA, J.N. (1989). A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycological Research*, 92: 486-488.

LECROY, C.; MASIELLO, C.A.; RUDGERS, J.A.; HOCKADAY, W.C.; SILBERG, J.J. (2013). Nitrogen, biochar and mycorrhizae: alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface. *Soil Biology and Biochemistry*, 58: 248-254.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. (2006). Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, 11: 403-427.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (2009). *Biochar for Environmental Management*. London-Sterling: Earthscan.

LEHMANN, J.; RILLING, M.C.; THIES, J.; MASIELLO, C.A.; HOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D. (2011). Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biol. Biochem.*, 43: 1812-36.

LISSARRAGUE, J.; DE TODA, F. (2009). Informe vitícola. Cuestiones referentes al sector del viñedo más relevantes para la definición de la política de seguros agrarios: situación actual y tendencias a corto y medio plazo. Universidad de La Rioja.

MAJOR, J. (2010). Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems. International Biochar Initiative.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant And Soil*, (1-2).

- MANYÀ, J. J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental science & technology*, 46(15): 7939-7954.
- MANYÀ, J. J.; LAGUARTA, S.; ORTIGOSA, M. A.; MANSO, J. A. (2014). Biochar from slow pyrolysis of two-phase olive mill waste: Effect of pressure and peak temperature on its potential stability. *Energy and Fuels*. 27(10): 5931-5939.
- MECO, R.; LACASTA, C.; MORENO, M.M. (2011). *Agricultura Ecológica en Secano: soluciones sostenibles en ambientes mediterráneos*. Mundi-Prensa. 495 pp. Madrid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (MAGRAMA). (2015). Balance del vino. [En línea] [Consultado el 24/10/2017]. Disponible en: [www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticasagrarias/agricultura/balance-del-vino/](http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticasagrarias/agricultura/balance-del-vino/)
- OGAWA, M.; OKIMORI, Y.; TAKAHASHI, F. (2006). Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation : Three case studies. *Mitig. Adaptat. Strateg. Global Change*, 11: 429-444.
- OKIMORI, Y.; OGAWA, M.; TAKAHASHI, F. (2003). Potential of CO<sub>2</sub> emission reductions by carbonizing biomass waste from industrial tree plantation in south Sumatra, Indonesia. *Mitig. Adaptat. Strateg. Global Change*, 8: 261-280.
- PHILLIPS, J.M.; HAYMAN, D.S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assesment of infection. *Transactions os the British Mycological Society*, 55: 158-160.
- SCHENK, N.C. (1982). *Methods and Principles of Mycorrhizal Research*. The American Phytopathological Society. St. Paul, Minnesota. 244 pp.
- SEBASTIÁN, F.; GARCIA, D.; REZEAU, A. (2010). *Energía de la biomasa (volumen II)*. Prensas universitarias de Zaragoza. Zaragoza.
- SOHI, S. LOEZ-CAPEL, E., KRULL, E., BOL, R. (2009). Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. *CSIRO Land and Water Science Report 05/09*, 64 pp.
- SOTTILE, P.; ROVAI, L. (2016). *Alternativas de manejo autosustentable, para un viñedo en Colonia Caroya*. Universidad Nacional de Córdoba.
- WARNOCK, D.D.; LEHMANN, J.; KUYPER, T.W.; RILLING, M.C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant Soil*, 300: 9-20.

WOOLF, D.; AMONETTE, J.E.; STREET-PERROTT, F.A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (2010). Sustainable biochar to Mitigate Global Climate Change. *Nature Communications*, 1, 56pp.

## 7. ANEXOS

### Anexo I. Resultados caracterización mecánica de la muestra 1 biochar 400 °C

	Biomasa	Temperatura (°C)	Masa biochar (g)
Datos etiqueta bolsa	Sarmiento	400°C	201,16
Medida masa total real (g)	208,6		

	Masa (g)
Fracción gruesa > 2mm	204,20
Fracción fina < 2 mm	4,40
10 % fracción gruesa	20,42

Nº muestra	Descripción										Caída			
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	φ eq (mm)	Coefficiente φ/φeq	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura (m)	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)
1	0,50	7,40	74,00	4,50	1,50	1500,00	5,08	0,89	0,33	1,10	2,00	0,20	0,30	Perpendiculares
2	0,55	6,80	68,00	6,00	2,00	2000,00	6,12	0,98	0,28	1,00	2,00	0,26	0,29	Perpendiculares
3	0,78	9,20	92,00	6,00	3,00	3000,00	6,44	0,93	0,26	1,00	2,00	0,39	0,39	Perpendiculares
4	0,36	6,00	60,00	4,00	1,00	1000,00	4,61	0,87	0,36	no				
5	0,22	5,40	54,00	4,00	1,00	1000,00	4,86	0,82	0,22	1,10	2,00	0,12	0,10	Perpendiculares
6	0,43	7,80	78,00	4,00	1,00	1000,00	4,04	0,99	0,43	1,00	2,00	0,20	0,23	Perpendiculares
7	0,97	9,90	99,00	5,50	3,00	3000,00	6,21	0,89	0,32	2,00	3,00	0,40	0,57	Perpendiculares
8	0,49	7,60	76,00	4,50	2,00	2000,00	5,79	0,78	0,25	1,00	3,00	0,32	0,17	Perpendiculares
9	0,46	7,40	74,00	5,00	1,25	1250,00	4,64	1,08	0,37	no				
10	0,08	10,40	104,00	4,00	3,00	3000,00	6,06	0,66	0,03	no				
11	0,33	8,60	86,00	3,50	1,50	1500,00	4,71	0,74	0,22	2,20	2,00	0,16	0,17	Perpendiculares



Nº muestra	Descripción									Caída				
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	φ eq (mm)	Coefficiente φ/φeq	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura (m)	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)
12	0,23	7,40	74,00	2,50	1,00	1000,00	4,15	0,60	0,23	1,20	2,00	0,11	0,12	Perpendiculares
13	0,48	6,80	68,00	4,50	1,25	1250,00	4,84	0,93	0,38	no				
14	0,65	8,00	80,00	6,00	2,25	2250,00	5,98	1,00	0,29	1,00	2,00	0,35	0,30	
15	0,15	4,90	49,00	3,50	0,75	750,00	4,41	0,79	0,20	no				
16	0,58	6,00	60,00	5,00	1,25	1250,00	5,15	0,97	0,46	1,00	2,00	0,28	0,30	Perpendiculares
17	1,00	10,20	102,00	5,00	2,00	2000,00	5,00	1,00	0,50	1,00	2,00	0,63	0,37	Perpendiculares
18	0,49	8,10	81,00	3,50	1,50	1500,00	4,86	0,72	0,33	2,20	3,00	0,38	0,11	Perpendiculares
19	0,57	9,40	94,00	5,00	2,00	2000,00	5,20	0,96	0,29	no				
20	0,30	3,50	35,00	4,00	1,00	1000,00	6,03	0,66	0,30	1,00	2,00	0,12	0,18	Perpendiculares
21	0,12	5,10	51,00	4,00	1,00	1000,00	5,00	0,80	0,12	1,35	2,00	0,15	0,03	Perpendiculares
22	0,19	4,50	45,00	4,50	0,50	500,00	3,76	1,20	0,38	2,00	2,00	0,08	0,11	Perpendiculares
23	0,17	4,30	43,00	3,50	0,50	500,00	3,85	0,91	0,34	1,10	2,00	0,06	0,11	Perpendiculares
24	0,05	2,90	29,00	2,00	0,20	200,00	2,96	0,67	0,25	no				
25	0,56	6,90	69,00	4,50	1,25	1250,00	4,80	0,94	0,45	1,10	2,00	0,30	0,26	Perpendiculares
26	0,32	7,00	70,00	3,50	1,25	1250,00	4,77	0,73	0,26	1,00	2,00	0,13	0,19	Perpendiculares
27	0,35	7,20	72,00	3,50	1,25	1250,00	4,70	0,74	0,28	no				
28	0,66	6,70	67,00	5,50	1,75	1750,00	5,77	0,95	0,38	1,00	2,00	0,50	0,16	Perpendiculares
29	0,62	5,70	57,00	6,00	1,75	1750,00	6,25	0,96	0,35	no				
30	0,29	6,10	61,00	2,00	1,00	1000,00	4,57	0,44	0,29	1,00	2,00	0,10	0,19	Perpendiculares
31	0,21	6,10	61,00	3,00	0,75	750,00	3,96	0,76	0,28	1,00	2,00	0,11	0,10	Perpendiculares

Nº muestra	Descripción									Caída				
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	$\phi$ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	$\phi$ eq (mm)	Coefficiente $\phi/\phi_{eq}$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura (m)	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)
32	0,24	6,20	62,00	3,00	0,75	750,00	3,92	0,76	0,32	no				
33	0,36	4,60	46,00	4,50	1,25	1250,00	5,88	0,77	0,29	1,00	2,00	0,24	0,12	Perpendiculares
34	0,56	6,60	66,00	6,00	1,75	1750,00	5,81	1,03	0,32	no				
35	0,32	4,50	45,00	4,50	1,00	1000,00	5,32	0,85	0,32	1,00	2,00	0,29	0,03	Perpendiculares
36	0,87	8,50	85,00	5,00	2,00	2000,00	5,47	0,91	0,44	1,00	2,00	0,41	0,46	Perpendiculares
37	0,20	11,40	114,00	3,00	1,50	1500,00	4,09	0,73	0,13	1,00	2,00	0,12	0,08	Perpendiculares
38	1,40	6,50	65,00	5,00	1,75	1750,00	5,85	0,85	0,80	1,00	2,00	0,09	1,31	Perpendiculares
39	0,18	5,40	54,00	2,50	0,50	500,00	3,43	0,73	0,36	1,00	2,00	0,10	0,08	Perpendiculares
40	0,92	5,80	58,00	5,50	3,00	3000,00	8,12	0,68	0,31	no				
41	0,43	7,80	78,00	4,00	1,00	1000,00	4,04	0,99	0,43	1,10	2,00	0,20	0,23	Perpendiculares
42	0,86	5,80	58,00	5,50	3,00	3000,00	8,12	0,68	0,29	1,35	2,00	0,41	0,45	Perpendiculares
43	0,36	5,80	58,00	5,50	3,00	3000,00	8,12	0,68	0,12	1,00	2,00	0,16	0,20	Perpendiculares
44	0,56	6,90	69,00	4,50	1,25	1250,00	4,80	0,94	0,45	1,00	2,00	0,28	0,28	Perpendiculares
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,46</b>	<b>6,80</b>	<b>67,98</b>	<b>4,33</b>	<b>1,50</b>	<b>1504,55</b>	<b>5,17</b>	<b>0,84</b>	<b>0,32</b>					

FRACCIÓN	MASA (g)
< 2mm	12,45
2mm < X < 2cm	48,11
2cm < X < 4cm	79,00
> 4cm	59,25

60 vueltas en  
1:28 min

Anexo II. Resultados caracterización mecánica de la muestra 2 biochar 400 °C

	Biomasa	Temperatura (°C)	Masa biochar (g)
Datos etiqueta bolsa	Sarmiento	400°C	183,69 g
Medida masa total real (g)	198		

	Masa (g)
Fracción gruesa > 2mm	190,40
Fracción fina < 2 mm	7,60
10 % fracción gruesa	19,12

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	φ equivalente (mm)	Coef φ/φeq	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de caída (m)	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)	
1	0,70	6,40	64,00	5,50	2,25	2250,00	6,69	0,82	0,31	2,20	2,00	0,65	0,02		6,00
2	1,30	12,10	121,00	6,50	2,50	2500,00	5,13	1,27	0,52	1,00	3,00	1,07	0,20	0,02	9/11
3	0,32	7,20	72,00	3,50	0,75	750,00	3,64	0,96	0,43	1,00	2,00	0,29	0,03		perpendicular
4	0,60	5,40	54,00	5,00	1,25	1250,00	5,43	0,92	0,48	no					
5	0,42	5,10	51,00	5,50	1,00	1000,00	5,00	1,10	0,42	1,10	2,00	0,36	0,02		6,00
6	0,17	5,85	58,50	2,50	0,50	500,00	3,30	0,76	0,34	1,00	2,00	0,07	0,09		perpendicular
7	0,15	6,00	60,00	3,00	0,75	750,00	3,99	0,75	0,20	2,00	2,00	0,13	0,01		5,50
8	0,28	6,80	68,00	3,50	0,75	750,00	3,75	0,93	0,37	1,00	3,00	0,25	0,02	0,01	7/5
9	0,51	5,70	57,00	5,00	1,25	1250,00	5,28	0,95	0,41	no					
10	0,88	7,60	76,00	5,00	2,25	2250,00	6,14	0,81	0,39	1,35	2,00	0,39	0,45		perpendicular
11	0,36	8,60	86,00	2,50	1,00	1000,00	3,85	0,65	0,36	2,20	2,00	0,19	0,17		4,00

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	φ equivalente (mm)	Coef φ/φeq	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de caída (m)	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo			Diámetros de rotura (mm)
12	0,82	6,65	66,50	5,00	2,00	2000,00	6,19	0,81	0,41	1,20	2,00	0,78	0,02		9,00
13	0,77	7,50	75,00	5,00	1,75	1750,00	5,45	0,92	0,44	no					
14	0,50	4,50	45,00	6,50	1,75	1750,00	7,04	0,92	0,29	1,00	2,00	0,45	0,04		12,00
15	0,11	4,95	49,50	3,25	0,50	500,00	3,59	0,91	0,22	no					
16	0,35	5,30	53,00	4,50	1,00	1000,00	4,90	0,92	0,35	1,00	2,00	0,32	0,03		8,00
17	0,57	9,10	91,00	5,00	2,00	2000,00	5,29	0,95	0,29	1,00	2,00	0,51	0,06		16,50
18	1,31	9,10	91,00	7,00	3,00	3000,00	6,48	1,08	0,44	2,20	2,00	1,25	0,05		7,50
19	0,46	5,45	54,50	4,00	1,25	1250,00	5,40	0,74	0,37	no					
20	0,31	5,40	54,00	4,00	1,00	1000,00	4,86	0,82	0,31	1,00	2,00	0,28	0,03		11,00
21	0,31	6,65	66,50	4,50	1,00	1000,00	4,38	1,03	0,31	1,35	2,00	0,26	0,03		7,50
22	0,31	7,20	72,00	3,50	0,75	750,00	3,64	0,96	0,41	2,00	2,00	0,19	0,08		perpendicular
23	0,32	6,95	69,50	3,00	0,75	750,00	3,71	0,81	0,43	1,10	2,00	0,22	0,10		perpendicular
24	0,22	6,90	69,00	3,00	0,75	750,00	3,72	0,81	0,29	2,20	2,00	0,08	0,11		perpendicular
25	0,32	7,85	78,50	4,00	1,00	1000,00	4,03	0,99	0,32	1,10	2,00	0,27	0,04		14,50
26	0,95	7,70	77,00	5,00	2,00	2000,00	5,75	0,87	0,48	1,00	3,00	0,75	0,08	0,10	3/12
27	0,39	6,25	62,50	3,50	0,50	500,00	3,19	1,10	0,78	no					
28	0,48	7,50	75,00	5,00	1,50	1500,00	5,05	0,99	0,32	1,00	2,00	0,43	0,04		7,00
29	0,43	4,50	45,00	6,00	1,50	1500,00	6,51	0,92	0,29	no					
30	0,41	5,15	51,50	5,00	1,50	1500,00	6,09	0,82	0,27	1,00	2,00	0,18	0,23	0.178/0.230	perpendicular
31	0,53	7,35	73,50	5,00	1,75	1750,00	5,51	0,91	0,30	1,00	2,00	0,48	0,05	0.478/0.050	9,00
32	0,14	6,50	65,00	2,75	0,50	500,00	3,13	0,88	0,28	no					

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	φ equivalente (mm)	Coef φ/φeq	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de caída (m)	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)	
33	0,49	5,00	50,00	6,00	1,50	1500,00	6,18	0,97	0,33	1,00	2,00	0,46	0,02	0.463/0.024	6,00
34	0,33	5,50	55,00	4,50	1,00	1000,00	4,81	0,94	0,33	1,00	3,00	0,27	0,01	0,01	5/8.5
35	0,12	5,80	58,00	3,00	0,75	750,00	4,06	0,74	0,16	2,20	2,00	0,05	0,07		perpendicular
36	0,50	6,00	60,00	5,00	1,50	1500,00	5,64	0,89	0,33	1,10	2,00	0,42	0,07		8,00
37	0,19	4,35	43,50	4,00	0,75	750,00	4,69	0,85	0,25	1,50	2,00	0,12	0,03		6,00
38	0,18	4,80	48,00	3,50	1,00	1000,00	5,15	0,68	0,18	2,20	2,00	0,14	0,01		4,50
39	0,14	4,40	44,00	2,00	0,25	250,00	2,69	0,74	0,56	no					
40	0,39	4,40	44,00	4,75	1,00	1000,00	5,38	0,88	0,39	1,00	2,00	0,36	0,03		5,50
41	0,27	3,90	39,00	4,00	1,00	1000,00	5,71	0,70	0,27	1,00	2,00	0,23	0,04		9,00
42	0,23	5,55	55,50	3,50	0,75	750,00	4,15	0,84	0,31	0,19	2,00	0,11	0,12		
43	0,29	2,30	23,00	7,00	1,00	1000,00	7,44	0,94	0,29	no					
44	0,09	3,60	36,00	3,00	0,25	250,00	2,97	1,01	0,36	no					
45	0,10	4,80	48,00	3,00	0,50	500,00	3,64	0,82	0,20	1,00	2,00	0,07	0,02		perpendicular
46	0,09	3,65	36,50	2,75	0,25	250,00	2,95	0,93	0,36	1,00	2,00	0,07	0,02		36,00
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,42</b>	<b>6,07</b>	<b>60,71</b>	<b>4,30</b>	<b>1,16</b>	<b>1163,04</b>	<b>4,82</b>	<b>0,89</b>	<b>0,35</b>						

FRACCIÓN	MASA (g)
< 2mm	15,30
2mm < X < 2cm	51,60
2cm < X < 4cm	60,60
> 4cm	56,00

60 vueltas en 1:35 min

Anexo III. Resultados caracterización mecánica de la muestra 3 biochar 400 °C

	Biomasa	Fecha experimento	Temperatura (°C)	Masa biochar (g)
Datos etiqueta bolsa	Sarmiento	07-jun	400°C	209.86g
Medida masa total real (g)	227.2g			

	Masa (g)
Fracción gruesa > 2mm	217,80
Fracción fina < 2 mm	9,40
10 % fracción gruesa	21,78

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm³)	V (mm³)	φ equivalente (mm)	Coef φ/φ <sub>q</sub>	Densidad (g/cm³)	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)	
1	0,37	5,05	50,50	5,00	1,50	1500,00	6,15	0,81	0,25	2,20	2,00	0,33	0,04		9,00
2	0,25	4,15	41,50	4,50	0,75	750,00	4,80	0,94	0,33	2,00	2,00	0,23	0,02		2,5
3	0,15	5,30	53,00	3,00	0,50	500,00	3,47	0,87	0,30	1,15	2,00	0,11	0,04		perpendicular
4	0,21	4,70	47,00	5,00	0,75	750,00	4,51	1,11	0,28	no					
5	0,38	4,90	49,00	4,00	1,00	1000,00	5,10	0,78	0,38	no					
6	0,46	3,90	39,00	6,50	1,75	1750,00	7,56	0,86	0,26	no					
7	0,38	6,10	61,00	3,50	1,00	1000,00	4,57	0,77	0,38	1,10	2,00	0,24	0,14		perpendicular



Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	Φ (mm)	V (cm³)	V (mm³)	Φ equivalente (mm)	Coef φ/φe q	Densidad (g/cm³)	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)	
8	0,21	4,80	48,00	3,00	0,75	750,00	4,46	0,67	0,28	1,00	2,00	0,16	0,05		perpendicular
9	0,46	5,00	50,00	5,00	1,75	1750,00	6,68	0,75	0,26	1,00	2,00	0,43	0,03		11,00
10	0,60	3,50	35,00	8,50	1,75	1750,00	7,98	1,07	0,34	no					
11	0,53	3,60	36,00	7,00	1,50	1500,00	7,28	0,96	0,35	no					
12	0,35	5,05	50,50	6,50	1,00	1000,00	5,02	1,29	0,35	1,15	2,00	0,20	0,15		perpendicular
13	0,33	2,90	29,00	7,00	1,00	1000,00	6,63	1,06	0,33	1,10	3,00	0,12	0,17	0,03	27/9
14	0,34	4,60	46,00	5,00	1,25	1250,00	5,88	0,85	0,27	1,50	2,00	0,33	0,02		3,00
15	0,28	5,30	53,00	4,00	1,00	1000,00	4,90	0,82	0,28	1,15	5,00	0,11	0,09	0.022/0.032/0.013	22/15/21/12
16	0,46	3,75	37,50	6,00	1,00	1000,00	5,83	1,03	0,46	no					
17	0,38	4,90	49,00	5,50	1,00	1000,00	5,10	1,08	0,38	1,35	2,00	0,19	0,18		3,00
18	0,16	4,10	41,00	3,00	0,50	500,00	3,94	0,76	0,32	1,00	2,00	0,09	0,07		perpendicular
19	0,55	4,80	48,00	5,50	1,50	1500,00	6,31	0,87	0,37	no					
20	0,79	4,70	47,00	6,00	2,00	2000,00	7,36	0,82	0,40	1,15	2,00	0,63	0,16		perpendicular
21	0,57	5,20	52,00	5,50	1,25	1250,00	5,53	0,99	0,46	no					

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	Φ (mm)	V (cm³)	V (mm³)	Φ equivalente (mm)	Coef φ/φe q	Densidad (g/cm³)	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)	
22	0,25	5,70	57,00	3,00	0,75	750,00	4,09	0,73	0,33	1,20	2,00	0,2 2	0,0 2		perpendicular
23	0,28	4,40	44,00	7,00	1,00	1000,00	5,38	1,30	0,28	1,10	2,00	0,1 1	0,1 6		perpendicular
24	0,30	6,30	63,00	3,00	0,75	750,00	3,89	0,77	0,40	1,10	2,00	0,1 4	0,1 5		perpendicular
25	0,29	4,30	43,00	4,50	0,75	750,00	4,71	0,95	0,39	no					
26	0,29	4,80	48,00	4,00	1,00	1000,00	5,15	0,78	0,29	1,15	2,00	0,2 6	0,0 2		12
27	0,39	4,35	43,50	4,00	1,00	1000,00	5,41	0,74	0,39	1,15	2,00	0,3 4	0,0 5		9,50
28	0,17	4,10	41,00	3,00	0,50	500,00	3,94	0,76	0,34	1,35	3,00	0,1 2	0,0 3	0,01	perpendicular/11
29	0,47	6,40	64,00	4,00	1,00	1000,00	4,46	0,90	0,47	1,20	2,00	0,2 9	0,1 7		perpendicular
30	0,11	1,70	17,00	5,00	0,25	250,00	4,33	1,16	0,44	1,00	2,00	0,0 8	0,0 3		perpendicular
31	0,43	3,40	34,00	5,50	1,25	1250,00	6,84	0,80	0,34	1,50	2,00	0,4 0	0,0 2		6,50
32	0,32	4,50	45,00	4,00	1,00	1000,00	5,32	0,75	0,32	no					
33	0,17	3,65	36,50	3,00	0,50	500,00	4,18	0,72	0,34	no					
34	0,26	2,95	29,50	5,50	0,75	750,00	5,69	0,97	0,35	no					
35	0,11	3,30	33,00	6,00	0,25	250,00	3,11	1,93	0,44	2,00	2,00	0,0 6	0,0 4		20,50
36	0,37	4,60	46,00	4,50	1,50	1500,00	6,44	0,70	0,25	1,10	2,00	0,1 8	0,2 5		perpendicular

Nº muestra	Descripción									Caída				
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm³)	V (mm³)	φ equivalente (mm)	Coef φ/φe q	Densidad (g/cm³)	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)
37	0,12	5,40	54,00	2,50	0,50	500,00	3,43	0,73	0,24	1,00	2,00	0,09	0,03	perpendicular
38	0,33	3,80	38,00	5,00	1,00	1000,00	5,79	0,86	0,33	no				
39	0,31	5,05	50,50	4,00	1,25	1250,00	5,61	0,71	0,25	1,00	2,00	0,27	0,04	26,00
40	0,37	3,50	35,00	4,00	1,00	1000,00	6,03	0,66	0,37	no				
41	0,17	3,60	36,00	3,50	0,50	500,00	4,21	0,83	0,34	1,15	2,00	0,13	0,03	16,50
42	0,26	3,90	39,00	4,50	0,75	750,00	4,95	0,91	0,35	1,00	2,00	0,18	0,08	15,50
43	0,59	4,90	49,00	5,00	1,75	1750,00	6,74	0,74	0,34	2,20	2,00	0,33	0,25	0.326/0.251 perpendicular
44	0,28	4,30	43,00	4,50	1,00	1000,00	5,44	0,83	0,28	1,15	2,00	0,19	0,08	2,50
45	0,45	5,00	50,00	4,50	1,00	1000,00	5,05	0,89	0,45	no				
46	0,28	4,65	46,50	3,50	1,00	1000,00	5,23	0,67	0,28	1,00	2,00	0,14	0,14	perpendicular
47	0,43	3,85	38,50	5,00	1,00	1000,00	5,75	0,87	0,43	1,15	2,00	0,25	0,18	perpendicular
48	0,28	5,20	52,00	3,00	1,00	1000,00	4,95	0,61	0,28	no				
49	0,35	6,10	61,00	4,00	1,00	1000,00	4,57	0,88	0,35	2,20	2,00	0,15	0,20	perpendicular
50	0,34	3,00	30,00	5,00	1,00	1000,00	6,51	0,77	0,34	1,00	4,00	0,02	0,01	3/8.5/7

Nº muestra	Descripción									Caída				
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	Φ (mm)	V (cm³)	V (mm³)	Φ equivalente (mm)	Coef φ/φe q	Densidad (g/cm³)	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)
51	0,39	4,20	42,00	5,00	1,00	1000,00	5,51	0,91	0,39	1,00	2,00	0,32	0,06	20,50
52	0,22	4,60	46,00	4,00	0,75	750,00	4,56	0,88	0,29	no				
53	0,15	2,80	28,00	4,00	0,50	500,00	4,77	0,84	0,30	1,15	2,00	0,13	0,01	8,50
54	0,23	3,80	38,00	4,00	0,75	750,00	5,01	0,80	0,31	no				
55	0,18	4,40	44,00	3,00	0,50	500,00	3,80	0,79	0,36	1,20	2,00	0,16	0,02	perpendicular
56	0,14	3,95	39,50	4,00	0,50	500,00	4,01	1,00	0,28	1,35	2,00	0,12	0,02	perpendicular
57	0,49	5,50	55,00	6,00	1,75	1750,00	6,36	0,94	0,28	1,00	2,00	0,42	0,06	perpendicular
58	0,35	3,90	39,00	5,00	1,00	1000,00	5,71	0,88	0,35	no				
59	0,16	4,10	41,00	3,50	0,50	500,00	3,94	0,89	0,32	no				
60	0,20	5,40	54,00	3,00	0,75	750,00	4,21	0,71	0,27	no				
61	0,08	2,9	29,00	4	0,25	250,00	3,31	1,21	0,32	1,15	2,00	0,05	0,03	perpendicular
62	0,21	4	40,00	4	0,5	500,00	3,99	1,00	0,42	1	2,00	0,18	0,03	16,5
63	0,14	2,9	29,00	4	0,5	500,00	4,69	0,85	0,28	1,2	2,00	0,09	0,05	perpendicular
64	0,37	4,3	43,00	6	1,25	1250,00	6,08	0,99	0,30	1,1	3,00	0,31	0,03	0,016 18/12.5
65	0,16	2,6	26,00	4	0,5	500,00	4,95	0,81	0,32	1,15	2,00	0,11	0,05	21
66	0,10	5	50,00	3	0,75	750,00	4,37	0,69	0,13	no				

Nº muestra	Descripción									Caída				
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	Φ (mm)	V (cm³)	V (mm³)	Φ equivalente (mm)	Coef Φ/Φe q	Densidad (g/cm³)	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo		Diámetros de rotura (mm)
67	0,25	4,7	47,00	3,5	1	1000,00	5,20	0,67	0,25	2,2	2,00	0,19	0,06	perpendicular
68	0,1	2,8	28,00	3	0,25	250,00	3,37	0,89	0,40	2,2	2,00	0,07	0,03	perpendicular
69	0,09	2,1	21,00	3	0,25	250,00	3,89	0,77	0,36	1,15	2,00	0,06	0,02	perpendicular
70	0,1	2,9	29,00	5	0,5	500,00	4,69	1,07	0,20	no				
71	0,2	3,35	33,50	5	0,75	750,00	5,34	0,94	0,27	1,5	2,00	0,10	0,06	perpendicular
72	0,22	4,7	47,00	4,5	0,75	750,00	4,51	1,00	0,29	1,15	2,00	0,16	0,05	perpendicular
73	0,05	2,6	26,00	3	0,25	250,00	3,50	0,86	0,20	no				
74	0,07	1,9	19,00	5	0,25	250,00	4,09	1,22	0,28	1,15	2,00	0,05	0,02	15
75	0,09	2,1	21,00	4	0,25	250,00	3,89	1,03	0,36	1,15	2,00	0,06	0,02	perpendicular
76	0,06	1,3	13,00	4,5	0,25	250,00	4,95	0,91	0,24	no				
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,29</b>	<b>4,16</b>	<b>41,55</b>	<b>4,47</b>	<b>0,88</b>	<b>878,29</b>	<b>5,07</b>	<b>0,89</b>	<b>0,33</b>					

<b>FRACCIÓN</b>	<b>MASA (g)</b>
<b>&lt; 2mm</b>	14,40
<b>2mm &lt; X &lt; 2cm</b>	43,40
<b>2cm &lt; X &lt; 4cm</b>	101,90
<b>&gt; 4cm</b>	50,00

60 vueltas en  
1:10min

Anexo IV, Resultados caracterización mecánica de muestra 1 biochar 600 °C.

	Biomasa	Temperatura (°C)	Masa biochar (g)
Datos etiqueta bolsa	Sarmiento	600	163,29g
Medida masa total real (g)	176,9g		

	Masa (g)
Fracción gruesa > 2mm	169,30
Fracción fina < 2 mm	7,60
10 % fracción gruesa	16,89

Nº muestra	Descripción									Caída			
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	$\phi$ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	$\phi$ equivalente (mm)	Coefficiente $\phi/\phi_{eq}$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo	Diámetros de rotura (mm)
1	0,20	5,85	58,50	3,50	0,50	500,00	3,30	1,06	0,40	1,10	2,00	0.182/0.009	perpendicular
2	0,31	5,80	58,00	4,00	0,75	750,00	4,06	0,99	0,41	1,10	2,00	0.260/0.040	perpendicular
3	0,42	4,90	49,00	6,00	1,00	1000,00	5,10	1,18	0,42	1,15	3,00	0.261/0.092/0.043	3/13
4	0,31	4,15	41,50	5,00	0,75	750,00	4,80	1,04	0,41	1,00	2,00	0.245/0.056	perpendicular
5	0,82	4,25	42,50	6,50	2,00	2000,00	7,74	0,84	0,41	1,10	2,00	0.777/0.037	5,00
6	0,24	3,25	32,50	5,00	0,75	750,00	5,42	0,92	0,33	1,00	2,00	0.113/0.014	13,00
7	0,13	3,35	33,50	4,00	0,50	500,00	4,36	0,92	0,26	no			
8	0,43	3,30	33,00	5,50	1,00	1000,00	6,21	0,89	0,43	no			
9	0,32	5,70	57,00	4,00	1,00	1000,00	4,73	0,85	0,32	1,35	2,00	0.248/0.031	4,50
10	0,18	3,70	37,00	2,00	0,50	500,00	4,15	0,48	0,35	1,00	2,00	0.144/0.031	17,00
11	0,23	4,50	45,00	4,00	0,75	750,00	4,61	0,87	0,30	2,20	3,00	0.184/0.011/0.008	8/5
12	0,39	4,30	43,00	5,50	1,00	1000,00	5,44	1,01	0,39	no			

Nº muestra	Descripción									Caída			
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm3)	V (mm3)	φ equivalente (mm)	Coefficiente φ/φeq	Densidad (g/cm3)	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo	Diámetros de rotura (mm)
13	0,24	5,50	55,00	3,00	0,75	750,00	4,17	0,72	0,32	2,20	2,00	0.198/0.027	perpendicular
14	0,27	4,60	46,00	5,00	1,00	1000,00	5,26	0,95	0,27	1,00	2,00	0.247/0.019	3,50
15	0,26	5,50	55,00	4,00	0,50	500,00	3,40	1,18	0,53	no			
16	0,41	4,70	47,00	5,00	1,00	1000,00	5,20	0,96	0,41	2,20	2,00	0.083/0.152	perpendicular
17	0,23	5,70	57,00	4,00	0,75	750,00	4,09	0,98	0,31	no			
18	0,16	3,80	38,00	3,00	0,50	500,00	4,09	0,73	0,32	no			
19	0,31	3,90	39,00	5,00	1,00	1000,00	5,71	0,88	0,31	1,00	2,00	0.276/0.028	5,00
20	0,44	5,25	52,50	4,00	0,75	750,00	4,26	0,94	0,58	1,00	2,00	0.393/0.042	7,00
21	0,22	5,35	53,50	3,55	0,50	500,00	3,45	1,03	0,44	2,00	2,00	0.205/0.011	3,00
22	0,32	4,00	40,00	6,50	1,00	1000,00	5,64	1,15	0,32	1,00	2,00	0.285/0.024	4,50
23	0,13	4,10	41,00	3,00	0,25	250,00	2,79	1,08	0,51	1,15	3,00	0.065/0.050/0.012	perpendicular/9.5
24	0,31	3,15	31,50	5,50	1,00	1000,00	6,36	0,87	0,31	1,20	2,00	0.267/0.027	6,00
25	0,23	3,70	37,00	6,00	0,50	500,00	4,15	1,45	0,47	1,10	2,00	0.92/0.028	16,00
26	0,21	4,15	41,50	3,15	0,25	250,00	2,77	1,14	0,85	no			
27	0,40	5,30	53,00	5,00	1,00	1000,00	4,90	1,02	0,40	1,00	2,00	0.376/0.027	12,00
28	0,25	3,65	36,50	5,00	0,50	500,00	4,18	1,20	0,50	1,10	2,00	0.224/0.022	12,00
29	0,19	3,65	36,50	4,00	0,50	500,00	4,18	0,96	0,37	1,35	3,00	0.127/0.042/0.016	3.5/7.5
30	0,31	4,85	48,50	4,00	1,00	1000,00	5,12	0,78	0,31	no			
31	0,22	4,50	45,00	4,00	0,50	500,00	3,76	1,06	0,44	1,10	2,00	0.164/0.055	perpendicular
32	0,15	3,40	34,00	3,00	0,25	250,00	3,06	0,98	0,58	no			
33	0,52	4,90	49,00	5,00	1,80	1800,00	6,84	0,73	0,29	1,10	3,00	0.329/0.098/0.075	4/18



Nº muestra	Descripción									Caída			
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	φ equivalente (mm)	Coefficiente φ/φ <sub>eq</sub>	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo	Diámetros de rotura (mm)
34	0,38	4,80	48,00	5,00	1,00	1000,00	5,15	0,97	0,38	no			
35	0,29	6,85	68,50	4,00	0,80	800,00	3,86	1,04	0,36	1,00	2,00	0.208/0.077	perpendicular
36	0,23	4,50	45,00	4,50	1,00	1000,00	5,32	0,85	0,23	no			
37	0,18	4,45	44,50	3,00	0,50	500,00	3,78	0,79	0,36	no			
38	0,18	3,90	39,00	3,50	0,75	750,00	4,95	0,71	0,23	1,00	2,00	0.155/0.021	perpendicular
39	0,13	3,40	34,00	3,50	0,50	500,00	4,33	0,81	0,25	no			
40	0,24	3,50	35,00	5,50	1,00	1000,00	6,03	0,91	0,24	1,10	2,00	0.218/0.020	14,00
41	0,15	3,55	35,50	3,50	0,50	500,00	4,23	0,83	0,29	2,00	3,00	0.083/0.044/0.014	12/6
42	0,36	3,85	38,50	5,00	1,00	1000,00	5,75	0,87	0,36	no			
43	0,27	4,30	43,00	4,00	1,00	1000,00	5,44	0,74	0,27	1,00	2,00	0.214/0.056	3,00
44	0,27	4,40	44,00	4,00	1,00	1000,00	5,38	0,74	0,27	1,00	3,00	0.241/0.020/0.010	12.5/8.5
45	0,44	4,35	43,50	6,50	1,50	1500,00	6,63	0,98	0,29	1,00	2,00	0.312/0.055	perpendicular
46	0,17	3,40	34,00	4,00	1,00	1000,00	6,12	0,65	0,17	1,35	2,00	0.250/0.015	perpendicular
47	0,25	5,10	51,00	3,50	1,00	1000,00	5,00	0,70	0,25	no			
48	0,18	4,80	48,00	4,50	0,75	750,00	4,46	1,01	0,24	1,00	2,00	0.153/0.027	3,50
49	0,22	4,55	45,50	4,00	1,00	1000,00	5,29	0,76	0,22	no			
50	0,41	5,50	55,00	4,00	1,00	1000,00	4,81	0,83	0,41	2,00	2,00	0.343/0.060	2,00
51	0,30	5,45	54,50	3,50	1,00	1000,00	4,83	0,72	0,30	1,20	2,00	0.281/0.015	perpendicular
52	0,35	3,60	36,00	5,50	1,00	1000,00	5,95	0,92	0,35	1,15	2,00	0.314/0.029	7,00
53	0,11	2,75	27,50	4,00	0,50	500,00	4,81	0,83	0,22	1,00	2,00	0.090/0.019	14,00
54	0,34	3,60	36,00	5,00	1,00	1000,00	5,95	0,84	0,34	1,00	2,00	0.343/0.061	18,00
55	0,27	2,90	29,00	5,00	1,00	1000,00	6,63	0,75	0,27	1,50	2,00	0.102/0.059	4,00

Nº muestra	Descripción									Caída			
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	$\phi$ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	$\phi$ equivalente (mm)	Coefficiente $\phi/\phi_{eq}$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura	Nº trozos	Masa (g) de cada trozo	Diámetros de rotura (mm)
56	0,40	3,85	38,50	5,50	1,00	1000,00	5,75	0,96	0,40	no			
57	0,31	3,20	32,00	5,00	0,75	750,00	5,46	0,92	0,42	1,20	2,00	0.270/0.040	15,50
58	0,23	3,70	37,00	5,00	0,50	500,00	4,15	1,21	0,46	no			
59	0,14	3,85	38,50	4,00	0,50	500,00	4,07	0,98	0,29	1,00	2,00	0.131/0.014	9,50
60	0,11	2,30	23,00	2,50	0,50	500,00	5,26	0,48	0,21	no			
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,28</b>	<b>4,29</b>	<b>42,85</b>	<b>4,38</b>	<b>0,81</b>	<b>814,17</b>	<b>4,88</b>	<b>0,91</b>	<b>0,36</b>				

FRACCIÓN	MAS A (g)
< 2mm	6,90
2mm < X < 2cm	30,60
2cm < X < 4cm	89,10
> 4cm	36,60

60 vueltas  
en 1:07min

Anexo V. Resultados caracterización mecánica de muestra 2 biochar 600 °C.

	Biomasa	Temperatura (°C)	Masa biochar (g)
Datos etiqueta bolsa	Sarmiento	600	185,1
Medida masa total real (g)	185,1		

	Masa (g)
Fracción gruesa > 2mm	178,90
Fracción fina < 2 mm	6,20
10 % fracción gruesa	17,95

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	$\phi$ (mm)	V (cm <sup>3</sup> ) (cm <sup>3</sup> = ml)	V (mm <sup>3</sup> )	$\phi$ equivalente (mm)	Coefficiente $\phi/\phi_{eq}$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura (m)	Nº trozos rotura	Masa (g) de cada trozo		Sección de rotura (mm)	
1	0,42	5,45	54,50	4,50	1,00	1000,00	4,83	0,93	0,42	1,00	2,00	0,32	0,10	Perpendicular	
2	0,35	5,10	51,00	4,50	0,75	750,00	4,33	1,04	0,47	1,20	2,00	0,20	0,15	Perpendicular	
3	0,20	3,50	35,00	4,25	0,50	500,00	4,26	1,00	0,40	1,20	2,00	0,17	0,01	5,50	
4	0,23	4,80	48,00	4,00	0,75	750,00	4,46	0,90	0,31	1,00	2,00	0,20	0,03	8,50	
5	0,33	3,10	31,00	7,00	1,00	1000,00	6,41	1,09	0,33	1,20	2,00	0,17	0,15	31,50	
6	0,33	5,10	51,00	4,00	0,75	750,00	4,33	0,92	0,44	1,10	2,00	0,21	0,11	Perpendicular	
7	0,12	3,20	32,00	3,50	0,50	500,00	4,46	0,78	0,23	0,15	2,00	0,09	0,03	Perpendicular	
8	0,30	4,50	45,00	5,00	0,50	500,00	3,76	1,33	0,60	1,15	3,00	0,23	0,04	0,03	Perpendicular /10
9	0,32	4,60	46,00	3,50	0,75	750,00	4,56	0,77	0,42	1,35	2,00	0,20	0,11	Perpendicular	
10	0,44	4,00	40,00	5,00	1,00	1000,00	5,64	0,89	0,44	1,20	3,00	0,32	0,05	10,50	
11	0,47	5,15	51,50	6,00	1,00	1000,00	4,97	1,21	0,47	1,35	2,00	0,43	0,02	1/8	

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	Φ (mm)	V (cm³)	V (mm³)	Φ equivalente (mm)	Coefficiente Φ/Φ <sub>eq</sub>	Densidad (g/cm³)	Altura de rotura	Nº trozos rotura	Masa (g) de cada trozo			Sección de rotura (mm)
12	0,30	3,75	37,50	5,00	1,00	1000,00	5,83	0,86	0,30	1,10	3,00	0,21	0,07	0,02	Perpendicular /14.5
13	0,44	3,40	34,00	7,00	1,00	1000,00	6,12	1,14	0,44	1,00	2,00	0,33	0,10		22,00
14	0,61	6,40	64,00	5,50	1,50	1500,00	5,46	1,01	0,40	1,00	2,00	0,37	0,20		23,50
15	0,42	4,50	45,00	6,25	1,25	1250,00	5,95	1,05	0,34	1,50	2,00	0,35	0,00		4,00
16	0,34	4,25	42,50	5,00	1,00	1000,00	5,47	0,91	0,34	1,00	2,00	0,22	0,11		Perpendicular
17	0,16	3,30	33,00	5,00	0,75	750,00	5,38	0,93	0,22	1,35	2,00	0,12	0,04		20,50
18	0,43	5,25	52,50	5,00	1,00	1000,00	4,92	1,02	0,43	1,00	2,00	0,19	0,23		Perpendicular
19	0,24	3,90	39,00	4,50	1,00	1000,00	5,71	0,79	0,24	1,00	2,00	0,14	0,10		Perpendicular
20	0,09	6,00	60,00	3,00	0,50	500,00	3,26	0,92	0,18	1,00		0,27	0,04	0,02	6_8
21	0,33	4,45	44,50	5,00	1,00	1000,00	5,35	0,93	0,33	No	3,00				
22	0,36	6,00	60,00	4,00	1,00	1000,00	4,61	0,87	0,36	1,10	2,00	0,19	0,16		Perpendicular
23	0,30	3,65	36,50	6,00	0,75	750,00	5,11	1,17	0,40	No					
24	0,29	4,40	44,00	5,00	0,50	500,00	3,80	1,31	0,58	1,00	3,00	0,18	0,06	0,03	Perpendicular _14.5
25	0,22	3,75	37,50	4,00	0,75	750,00	5,05	0,79	0,29	1,20	2,00	0,12	0,10		Perpendicular
26	0,22	3,65	36,50	4,50	0,50	500,00	4,18	1,08	0,43	1,00	2,00	0,11	0,10		Perpendicular
27	0,33	2,95	29,50	6,50	1,00	1000,00	6,57	0,99	0,33	No					
28	0,14	3,10	31,00	4,00	0,50	500,00	4,53	0,88	0,28	No					
29	0,48	4,20	42,00	5,00	1,50	1500,00	6,74	0,74	0,32	1,00	3,00	0,24	0,19	0,05	Perpendicular_12
30	0,25	3,00	30,00	6,00	0,75	750,00	5,64	1,06	0,34	1,15	2,00	0,13	0,12		15,50
31	0,19	4,00	40,00	6,00	0,50	500,00	3,99	1,50	0,37	1,00	2,00	0,15	0,04		21,50
32	0,15	4,15	41,50	3,00	0,50	500,00	3,92	0,77	0,30	No					

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	Φ (mm)	V (cm³)	V (mm³)	Φ equivalente (mm)	Coefficiente Φ/Φ <sub>eq</sub>	Densidad (g/cm³)	Altura de rotura	Nº trozos rotura	Masa (g) de cada trozo			Sección de rotura (mm)
33	0,46	4,50	45,00	6,00	1,00	1000,00	5,32	1,13	0,46	1,10	3,00	0,27	0,16	0,03	Perpendicular_9
34	0,58	4,55	45,50	5,50	1,50	1500,00	6,48	0,85	0,39	1,00	2,00	0,53	0,05		17,00
35	0,35	4,00	40,00	5,00	1,00	1000,00	5,64	0,89	0,35	2,00	2,00	0,30	0,03		12,00
36	0,33	3,90	39,00	5,00	0,75	750,00	4,95	1,01	0,44	1,00	2,00	0,21	0,13		Perpendicular
37	0,19	3,10	31,00	5,00	0,50	500,00	4,53	1,10	0,37	1,00	2,00	0,12	0,07		Perpendicular
38	0,08	2,90	29,00	3,50	0,25	250,00	3,31	1,06	0,33	1,10	3,00	0,04	0,02	0,01	15.5_Perpendicular
39	0,20	3,60	36,00	4,00	0,50	500,00	4,21	0,95	0,40	1,20	2,00	0,11	0,08		Perpendicular
40	0,22	4,10	41,00	3,50	0,50	500,00	3,94	0,89	0,45	1,15	3,00	0,10	0,06	0,06	23_23
41	0,35	3,20	32,00	5,00	1,00	1000,00	6,31	0,79	0,35	2,20	2,00	0,20	0,11		4,50
42	0,34	5,60	56,00	4,50	1,00	1000,00	4,77	0,94	0,34	1,10	2,00	0,30	0,02		Perpendicular
43	0,23	3,30	33,00	4,50	0,50	500,00	4,39	1,02	0,45	No					
44	0,27	2,65	26,50	4,00	0,75	750,00	6,00	0,67	0,36	2,20	2,00	0,18	0,08		Perpendicular
45	0,36	4,10	41,00	5,00	1,00	1000,00	5,57	0,90	0,36	2,00	2,00	0,18	0,12		2,50
46	0,27	3,90	39,00	5,00	0,75	750,00	4,95	1,01	0,36	1,15	3,00	0,19	0,05	0,02	10_10
47	0,31	4,55	45,50	4,00	1,00	1000,00	5,29	0,76	0,31	No					
48	0,42	5,05	50,50	5,00	1,00	1000,00	5,02	1,00	0,42	1,10	2,00	0,25	0,17		Perpendicular
49	0,31	3,30	33,00	5,50	1,00	1000,00	6,21	0,89	0,31	No					
50	0,28	2,70	27,00	5,00	0,75	750,00	5,95	0,84	0,38	1,20	2,00	0,20	0,07		Perpendicular
51	0,18	4,00	40,00	3,50	0,25	250,00	2,82	1,24	0,70	1,10	2,00	0,13	0,05		Perpendicular
52	0,14	3,60	36,00	3,00	0,25	250,00	2,97	1,01	0,55	1,10	2,00	0,10	0,04		Perpendicular
53	0,12	4,00	40,00	3,50	0,25	250,00	2,82	1,24	0,50	1,00	3,00	0,07	0,04	0,01	Perpendicular_13.5
54	0,55	5,00	50,00	6,25	1,25	1250,00	5,64	1,11	0,44	1,00	2,00	0,34	0,22		Perpendicular

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	$\phi$ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	$\phi$ equivalente (mm)	Coefficiente $\phi/\phi_{eq}$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura	Nº trozos rotura	Masa (g) de cada trozo			Sección de rotura (mm)
55	0,20	4,00	40,00	3,00	0,50	500,00	3,99	0,75	0,40	1,20	3,00	0,13	0,04	0,02	
56	0,40	5,80	58,00	4,00	1,25	1250,00	5,24	0,76	0,32	1,00	2,00	0,13	0,28		Perpendicular
57	0,43	4,00	40,00	6,00	1,00	1000,00	5,64	1,06	0,43	2,00	3,00	0,19	0,11	0,09	Perpendicular
58	0,08	3,10	31,00	4,50	0,50	500,00	4,53	0,99	0,16	No					
59	0,15	3,50	35,00	4,00	0,50	500,00	4,26	0,94	0,29	1,20	2,00	0,08	0,06		Perpendicular
60	0,11	2,50	25,00	3,00	0,25	250,00	3,57	0,84	0,44	1,10	2,00	0,06	0,05		6,50
61	0,10	2,90	29,00	3,00	0,15	150,00	2,57	1,17	0,68	1,20	2,00	0,07	0,04		Perpendicular
62	0,16	3,20	32,00	3,50	0,50	500,00	4,46	0,78	0,33	1,00	2,00	0,15	0,02		8,00
<b>Promedio</b>	<b>0,29</b>	<b>4,05</b>	<b>40,51</b>	<b>4,66</b>	<b>0,78</b>	<b>776,61</b>	<b>4,85</b>	<b>0,97</b>	<b>0,38</b>						

Procesado con removedor 60 vueltas en 1:07min

FRACCIÓN	MASA (g)
< 2mm	8,00
2mm < X < 2cm	32,80
2cm < X < 4cm	105,60
> 4cm	30,60

Anexo VI. Resultados caracterización mecánica de muestra 3 biochar 600 °C.

	Biomasa	Temperatura (°C)	Masa biochar (g)
Datos etiqueta bolsa	Sarmiento	600	172,57
Medida masa total real (g)	185,1		

	Masa (g)
Fracción gruesa > 2mm	178,90
Fracción fina < 2 mm	6,20
10 % fracción gruesa	17,95

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g) (g)	L (cm)	L (mm)	$\phi$ (mm)	V (cm <sup>3</sup> ) (cm <sup>3</sup> = ml)	V (mm <sup>3</sup> )	$\phi$ equivalente (mm)	Coefficiente $\phi/\phi_{eq}$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura (m)	Nº trozos rotura	Masa (g) de cada trozo			Sección de rotura (mm)
1	0,54	5,50	55,00	3,00	0,75	750,00	4,17	0,72	0,72	1,10	2,00	0,20	0,31	0,03	Perpendicular
2	0,27	4,60	46,00	5,00	1,00	1000,00	5,26	0,95	0,27	1,20	2,00	0,10	0,16		Perpendicular
3	0,26	5,50	55,00	4,00	0,50	500,00	3,40	1,18	0,53	1,35	2,00	0,12	0,10		Perpendicular
4	0,41	4,70	47,00	5,00	1,00	1000,00	5,20	0,96	0,41	1,10	2,00	0,20	0,21		Perpendicular
5	0,23	5,70	57,00	4,00	0,75	750,00	4,09	0,98	0,31	No					
6	0,26	3,80	38,00	3,00	0,50	500,00	4,09	0,73	0,52	1,20	2,00	0,11	0,13		Perpendicular
7	0,31	3,90	39,00	5,00	1,00	1000,00	5,71	0,88	0,31	1,20	2,00	0,16	0,15		Perpendicular
8	0,14	3,60	36,00	3,00	0,25	250,00	2,97	1,01	0,55	1,20	3,00	0,05	0,04	0,05	Perpendicular
9	0,12	4,00	40,00	3,50	0,25	250,00	2,82	1,24	0,50	1,35	2,00	0,05	0,07		4,30
10	0,55	5,00	50,00	6,25	1,25	1250,00	5,64	1,11	0,44	1,20	2,00	0,40	0,15		Perpendicular
11	0,40	4,00	40,00	3,00	0,50	500,00	3,99	0,75	0,80	No					

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	φ equivalente (mm)	Coefficiente φ/φ <sub>eq</sub>	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura	Nº trozos rotura	Masa (g) de cada trozo			Sección de rotura (mm)
12	0,40	5,80	58,00	4,00	1,25	1250,00	5,24	0,76	0,32	1,10	3,00	0,15	0,05	0,20	Perpendicular
13	0,43	4,00	40,00	6,00	1,00	1000,00	5,64	1,06	0,43	1,35	2,00	0,20	0,23		7,10
14	0,08	3,10	31,00	4,50	0,50	500,00	4,53	0,99	0,16	No					
15	0,26	3,50	35,00	4,00	0,50	500,00	4,26	0,94	0,52	1,35	2,00	0,12	0,13		Perpendicular
16	0,23	3,70	37,00	6,00	0,50	500,00	4,15	1,45	0,47	1,20	3,00	0,05	0,11	0,07	Perpendicular
17	0,21	4,15	41,50	3,15	0,25	250,00	2,77	1,14	0,85	1,10	2,00	0,10	0,11		4,00
18	0,40	5,30	53,00	5,00	1,00	1000,00	4,90	1,02	0,40	1,20	2,00	0,21	0,19		Perpendicular
19	0,25	3,65	36,50	5,00	0,50	500,00	4,18	1,20	0,50	1,35	3,00	0,09	0,13	0,02	Perpendicular
20	0,19	3,65	36,50	4,00	0,50	500,00	4,18	0,96	0,37	1,10	2,00	0,18	0,01		Perpendicular
21	0,51	4,85	48,50	4,00	1,00	1000,00	5,12	0,78	0,51	No					
22	0,22	4,50	45,00	4,00	0,50	500,00	3,76	1,06	0,44	1,35	2,00	0,08	0,14		Perpendicular
23	0,15	3,40	34,00	3,00	0,25	250,00	3,06	0,98	0,58	1,20	2,00	0,07	0,07		4,60
24	0,29	4,40	44,00	5,00	0,50	500,00	3,80	1,31	0,58	1,10	2,00	0,20	0,09		Perpendicular
25	0,33	2,95	29,50	6,50	1,00	1000,00	6,57	0,99	0,33	No					
26	0,34	3,10	31,00	4,00	0,50	500,00	4,53	0,88	0,68	No					
27	0,48	4,20	42,00	5,00	1,50	1500,00	6,74	0,74	0,32	1,10	2,00	0,42	0,06		Perpendicular
28	0,25	3,00	30,00	6,00	0,75	750,00	5,64	1,06	0,34	1,10	2,00	0,20	0,05		Perpendicular
29	0,36	4,00	40,00	6,00	0,50	500,00	3,99	1,50	0,72	1,35	3,00	0,08	0,25	0,03	Perpendicular
30	0,15	4,15	41,50	3,00	0,50	500,00	3,92	0,77	0,30	2,00	2,00	0,11	0,04		4,20
31	0,19	4,00	40,00	6,00	0,50	500,00	3,99	1,50	0,37	1,50	2,00	0,12	0,06		Perpendicular
32	0,25	4,15	41,50	3,00	0,50	500,00	3,92	0,77	0,50	1,10	2,00	0,20	0,05		Perpendicular
33	0,46	4,50	45,00	6,00	1,00	1000,00	5,32	1,13	0,46	No					



Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	φ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	φ equivalente (mm)	Coficiente φ/φ <sub>eq</sub>	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura	Nº trozos rotura	Masa (g) de cada trozo		Sección de rotura (mm)	
34	0,75	4,55	45,50	5,50	1,50	1500,00	6,48	0,85	0,50	1,50	2,00	0,49	0,26		Perpendicular
35	0,35	4,00	40,00	5,00	1,00	1000,00	5,64	0,89	0,35	1,10	3,00	0,07	0,17	0,11	Perpendicular
36	0,33	3,90	39,00	5,00	0,75	750,00	4,95	1,01	0,44	1,10	2,00	0,20	0,13		Perpendicular
37	0,19	3,10	31,00	5,00	0,50	500,00	4,53	1,10	0,37	No					
38	0,08	2,90	29,00	3,50	0,25	250,00	3,31	1,06	0,33	No					
39	0,50	3,60	36,00	4,00	0,50	500,00	4,21	0,95	1,00	1,20	2,00	0,30	0,20		Perpendicular
40	0,22	4,10	41,00	3,50	0,50	500,00	3,94	0,89	0,45	2,20	2,00	0,04	0,17		Perpendicular
41	0,35	3,20	32,00	5,00	1,00	1000,00	6,31	0,79	0,35	1,50	2,00	0,23	0,12		Perpendicular
42	0,50	5,60	56,00	4,50	1,00	1000,00	4,77	0,94	0,50	No					
43	0,20	3,60	36,00	4,00	0,50	500,00	4,21	0,95	0,40	2,20	2,00	0,11	0,09		5,80
44	0,22	4,10	41,00	3,50	0,50	500,00	3,94	0,89	0,45	1,10	2,00	0,21	0,01		Perpendicular
45	0,35	3,20	32,00	5,00	1,00	1000,00	6,31	0,79	0,35	1,00	2,00	0,27	0,08		Perpendicular
46	0,34	5,60	56,00	4,50	1,00	1000,00	4,77	0,94	0,34	1,35	2,00	0,19	0,15		Perpendicular
47	0,23	3,30	33,00	4,50	0,50	500,00	4,39	1,02	0,45	No					
48	0,27	2,65	26,50	4,00	0,75	750,00	6,00	0,67	0,36	2,20	3,00	0,11	0,07	0,09	Perpendicular
49	0,36	4,10	41,00	5,00	1,00	1000,00	5,57	0,90	0,36	1,50	2,00	0,02	0,34		Perpendicular
50	0,27	3,90	39,00	5,00	0,75	750,00	4,95	1,01	0,36	1,50	3,00	0,20	0,03	0,04	Perpendicular
51	0,45	4,55	45,50	4,00	1,00	1000,00	5,29	0,76	0,45	1,00	2,00	0,32	0,13		Perpendicular
52	0,42	5,05	50,50	5,00	1,00	1000,00	5,02	1,00	0,42	No					
53	0,45	3,30	33,00	5,50	1,00	1000,00	6,21	0,89	0,45	No					
54	0,28	2,70	27,00	5,00	0,75	750,00	5,95	0,84	0,38	1,50	2,00	0,20	0,08		5,30
55	0,18	4,00	40,00	3,50	0,25	250,00	2,82	1,24	0,70	2,20	2,00	0,05	0,13		Perpendicular

Nº muestra	Descripción									Caída					
	Masa (g)	L (cm)	L (mm)	$\phi$ (mm)	V (cm <sup>3</sup> )	V (mm <sup>3</sup> )	$\phi$ equivalente (mm)	Coficiente $\phi/\phi_{eq}$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Altura de rotura	Nº trozos rotura	Masa (g) de cada trozo		Sección de rotura (mm)	
56	0,14	3,60	36,00	3,00	0,25	250,00	2,97	1,01	0,55	1,10	2,00	0,06	0,07		Perpendicular
57	0,57	5,60	56,00	4,50	1,00	1000,00	4,77	0,94	0,57	1,20	2,00	0,49	0,08		Perpendicular
<b>Promedio</b>	<b>0,31</b>	<b>4,08</b>	<b>40,80</b>	<b>4,47</b>	<b>0,72</b>	<b>719,30</b>	<b>4,65</b>	<b>0,98</b>	<b>0,46</b>						

Procesado con removedor 60 vueltas en 1:07min

FRACCIÓN	MASA (g)
< 2mm	7,56
2mm < X < 2cm	35,60
2cm < X < 4cm	92,30
> 4cm	43,44

