

EVALUACIÓN DE EFECTOS DE VARIOS TIPOS DE BIOCHAR EN SUELO Y PLANTA

Autor: Daniel Paco Abenza

Director: Dr. Josep Maria Alcañiz Baldellou

Palabras clave: *barley, biochar, biomass, matters, mineralization, organic, pyrolysis, soil*

RESUMEN

El objetivo de este proyecto ha sido analizar los posibles efectos del biochar obtenido de restos de biomasa de resinosas, de caducifolios y de un lodo de depuradora por tres procedimientos de pirólisis (lenta, rápida y gasificación), sobre un suelo (*Haploxerept típico*) y una planta de interés agrícola (*Hordeum vulgare*). Adicionalmente, se han comparado los efectos del biochar con los producidos por la aplicación de los materiales originales, y la interacción del biochar sobre el fertilizante mineral incorporado al suelo. Por último, se ha completado el trabajo con la observación de la influencia del biochar en la formación de micorrizas.

Para llevar a cabo este estudio se ha realizado un ensayo en invernadero y diferentes análisis en laboratorio que han permitido el estudio comparativo de la germinación y crecimiento de la cebada, y de diferentes parámetros fisicoquímicos del suelo que podrían explicar la respuesta de las plantas crecidas sobre los distintos tipos de biochar.

A partir de la interpretación de los resultados se ha determinado que los diferentes tipos de biochar han provocado un mayor desarrollo de la cebada en comparación con la aplicación de sus respectivas materias primas, o bien se ha observado la desaparición de efectos inhibidores como en el caso de los lodos de depuradora. Por otro lado, ha destacado el biochar obtenido por pirólisis lenta del resto de los biochars puesto que se ha observado menor mineralización de su materia orgánica de los suelos y mayor eficiencia en el desarrollo de las plantas. Por último, el efecto de la enmienda orgánica en forma de biochar sobre el desarrollo de las plantas ha sido menor que el efecto provocado directamente por la fertilización mineral.

RESUM

L'objectiu d'aquest projecte ha estat analitzar els possibles efectes del biochar obtingut de restes de biomassa de resinoses, de caducifolis o d'un fang de depuradora per tres procediments de piròlisis (lenta, ràpida i gasificació), sobre un sòl (*Haploxerept típic*) i una planta d'interès agrícola (*Hordeum vulgare*). Adicionalment, s'han comparat els efectes del biochar amb els produïts per l'aplicació dels materials originals, i la interacció del biochar amb el fertilitzant mineral incorporat al sòl. Per últim, s'ha completat el treball amb l'observació de la influència del biochar en la formació de micorrizes.

Per portar a terme aquest estudi s'ha realitzat un assaig en hivernacle i diferents anàlisis al laboratori que han permès l'estudi comparatiu de la germinació i creixement de l'ordi, i de diferents paràmetres fisicoquímics del sòl que podrien explicar la resposta de les plantes crescudes als diferents tipus de biochar.

A partir de la interpretació dels resultats s'ha determinat que els diferents tipus de biochar han provocat un major desenvolupament de l'ordi en comparació amb l'aplicació de les seves respectives matèries primeres, o bé s'ha observat la desaparició d'efectes inhibidors com en el cas dels fangs de depuradora. Per altra banda, ha destacat el biochar obtingut per piròlisis lenta de la resta de biochars ja que s'ha observat una menor mineralització de la seva matèria orgànica als sòls i major eficiència en el desenvolupament de les plantes. Per últim, l'efecte de l'esmena orgànica en forma de biochar sobre el desenvolupament de les plantes ha estat menor que l'efecte provocat directament per la fertilització mineral.

ABSTRACT

The main aim of this research was to analyze the possible effects of biochar which was made from biomass of soft or hard wood or from a dried sewage sludge by three procedures of pyrolysis (slow, fast and gasification), on a soil (Typic *Haploxerept*) and on a common agricultural plant (*Hordeum vulgare*). Additionally, the effects of biochar were compared with those produced by the application of the raw materials, and the interaction of biochar with mineral fertilizer which was also applied. Finally, the influence of biochar on mycorrhizae formation was also investigated.

For this study, a bioassay was carried out in a greenhouse in conjunction with different laboratory analyses. These activities have allowed the comparative study of germination and seedling growth of barley and the effects on soil physicochemical parameters that could explain the response of plants grown with different kinds of biochar.

From the analyses of the results, it has been determined that biochars improved growth of barley compared to growth on the wood feedstock materials. Also it has been observed the lack of inhibitory effects of biochar derived from sewage sludge compared with their unprocessed material. Biochar obtained by slow pyrolysis has stood out against the others because its organic matter is less mineralisable and contributed to improved development of the plants. Finally, the effect of biochar as an organic amendment on plant development was less than the direct effect caused by mineral fertilization.

INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos del futuro energético podría ser la apuesta por las tecnologías de emisiones carbono-negativas, entre las que figura la pirólisis de la biomasa, con la finalidad de obtener gas y biocombustibles, y de aprovechar el carbono residual (biochar) como enmienda de suelos y facilitar así el secuestro del carbono (Sohi et al., 2009).

La palabra inglesa *biochar* es un término de reciente aparición y se refiere a un producto de grano fino y poroso similar en apariencia al carbón vegetal. Se produce a partir de la transformación de distintos tipos de biomasa mediante la técnica denominada pirolisis, que consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica bajo un aporte de oxígeno limitado (García, 2010). Científicos como Lehmann (2009) proponen en su definición la particularidad de denominar al material pirolizado como *biochar* cuando su destino es de aplicación como enmienda orgánica de suelos y para el secuestro de carbono en el mismo.

La base existente detrás del interés originado en los últimos años por la aplicación en suelos del biochar 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, Lehmann et al., 2006), y en segundo lugar, debido a investigaciones publicadas que han demostrado la estabilidad de este material frente a otras enmiendas orgánicas y su contribución al incremento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Cheng et al., 2008, Sohi et al., 2009).

Con la producción y aplicación del biochar al suelo se ha calculado (Woolf et al., 2010) que se podría llegar a reducir en un 12% las emisiones anuales de C-CO₂ equivalentes (1,8 Pg CO₂-Ceq/año de los 15,4 Pg CO₂-Ceq emitidos anualmente). El objetivo se centra en contribuir al secuestro de carbono en el suelo que constituye la mayor reserva de este elemento dentro de la biosfera (Lal, 2004). Por otra parte, la defensa del uso del biochar en suelos carece de sentido si no se realiza de una manera sostenible que incluya la gestión de las materias primas y el tipo de tecnología de pirólisis a usar (Woolf et al., 2010), así como la planificación de su uso local junto con el apoyo de estudios científicos y bajo objetivos ambientales definidos.

Atendiendo a los efectos conocidos del biochar sobre suelo y plantas, algunos de los aspectos que han sido estudiados son el aumento de la disponibilidad de nutrientes para las plantas en parte debidos a la mejora de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (CIC), así como la estimulación de los procesos biológicos que permiten mejorar la estructura del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua (Fowles, 2007, Glaser et al., 2000). En este sentido, Glaser (2002) encontró en suelos de *terra preta* una capacidad de retención de agua superior en un 18% en comparación a los suelos adyacentes. También se ha argumentado sobre la capacidad de este material para reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, aumentar el pH del suelo, así como la absorción de pesticidas y metales pesados (Major, 2010). Atendiendo al efecto de enmienda orgánica que produce la aplicación del biochar en suelos, la reducción en la densidad aparente y el aumento de materia orgánica permitirían reducir el laboreo mecánico, así como se obtendrían beneficios similares a los conocidos por la aplicación de enmiendas orgánicas (Krull et al., 2004). Por lo general, el biochar aumenta la productividad y calidad del suelo, sobre todo en suelos ácidos y pobres en nutrientes, como por ejemplo los oxisoles (Sohi et al., 2009). Se ha encontrado 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 (Sohi et al., 2009). Por otra parte, los efectos del biochar 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 et al., 2011).

OBJETIVOS

Este proyecto ha sido realizado con el **objetivo general** de evaluar los efectos más relevantes de varios tipos de biochar sobre un suelo y una planta de interés agrícola. Para ello, se han formulado los siguientes **objetivos específicos**:

- ✓ Estudiar los efectos de diferentes tipos de biochar, incorporados a un suelo como enmienda orgánica, sobre plantas de cebada (*Hordeum vulgare*) mediante el análisis de la germinación, crecimiento y otras respuestas biológicas.
- ✓ Analizar comparativamente los efectos de la aplicación de biochar y su materia prima sin pirolizar sobre el crecimiento del cultivo.
- ✓ Analizar el efecto del biochar sobre algunos parámetros fisicoquímicos del suelo que pueden influir a su vez sobre el desarrollo de las plantas.
- ✓ Estudiar la interacción del biochar con el fertilizante mineral convencional aplicado en el bioensayo con *Hordeum vulgare*.
- ✓ Explorar la posible existencia de micorrizas en el cultivo para su posterior caracterización.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo los objetivos planteados se realizó un ensayo en invernadero, el cual comenzó con el montaje previo a la siembra que se realizó la primera semana de Mayo de 2011 en uno de los invernaderos pertenecientes a los campos experimentales de la UAB. Se prepararon 192 tiestos de 2 L de capacidad para poder realizar ocho réplicas y dos muestreos para cada uno de los 12 tratamientos (tabla 1). Para realizar las mezclas de suelo y la plantación del cultivo fueron necesarios los siguientes materiales:

- Suelo: corresponde a una mezcla de la capa arable (horizonte Ap) del suelo clasificado como *Haploxerept típico* (*Soil Taxonomy, 2010*) perteneciente a los campos experimentales del Centro de Investigación en Tecnología Agroalimentaria (IRTA) situados en la finca Torre Marimón en el municipio de Caldes de Montbui.
- Materias primas: se han utilizado 3 tipos de biomasa diferentes que potencialmente se podrían incorporar a los suelos: astillas de madera de resinosas (pino), astillas de árboles caducifolios (chopo) y un lodo de depuradora urbana secado térmicamente.
- Biochar: producido a partir de las tres materias primas mencionadas, procede de tres plantas de pirolisis que funcionan con tres procedimientos de valorización energética de la biomasa muy diferenciados (pirólisis lenta, rápida y gasificación). La incorporación de los distintos tipos de biochar o de sus materiales de partida al suelo de referencia se realizó en una dosis equivalente al 1% de carbono.
- Fertilizante mineral: se empleó una mezcla NPK preparada en el laboratorio que se realizó en base a la dosis de nitrógeno recomendada para un cultivo de cebada, la cual es de 100 Kg N/ha en una mezcla 18:5:5 de NPK respectivamente. De acuerdo a los

objetivos del experimento solamente se adaptó a este régimen de fertilización un tratamiento control (OH). Para el resto de tratamientos se optó por aportar tan solo el 50% de las necesidades de nitrógeno, a excepción de un tratamiento control sin fertilizante (O). La siguiente tabla muestra los códigos de cada tratamiento así como el tipo de enmiendas orgánicas ensayadas y el régimen de fertilización aplicado.

Tabla 1. Identificación de los tratamientos de suelo con enmienda orgánica o sus respectivos biochars con indicación de la dosis de fertilizante NPK y biochar aplicada.

Tratamiento	Código	Fertilización (kg N·ha ⁻¹)	Fertilizante NPK (g)	Enmienda o biochar (g)
Control dosis doble fertilizante	OH	100	24,51	0
Control con fertilizante	OL	50	12,26	0
Suelo control	O	50	0	0
Suelo con astillas de pino	P0	50	12,26	475,7
Suelo con biochar de pino por pirólisis lenta	PL	50	12,26	262,4
Suelo con biochar de pino por pirólisis rápida	PR	50	12,26	394,5
Suelo con biochar de pino por gasificación	PG	50	12,26	318,7
Suelo con astillas de chopo	C0	50	12,26	497,4
Suelo con biochar de chopo por pirólisis lenta	CL	50	12,26	279,2
Suelo con biochar de chopo por pirólisis rápida	CR	50	12,26	343,9
Suelo con lodo de depuradora	F0	50	12,26	838,8
Suelo con biochar de lodo por pirólisis lenta	FL	50	12,26	1013,1

- Planta: Se ha empleado cebada (*Hordeum vulgare*), cereal ampliamente cultivado en España. Se plantaron 10 semillas/tiesto, que equivalen a una densidad de siembra de 468 plantas/m². Esta densidad de semillas se utilizó para la evaluación de la germinación y la longitud del cotiledón. Posteriormente, se aclaró la densidad de plantación a la mitad, es decir, 5 plántulas/tiesto.

El período de desarrollo de la plantación de cebada en invernadero fue de aproximadamente 3 meses (Mayo a Julio de 2011). A fin de alcanzar los objetivos planteados, se decidió realizar un par de muestreos destructivos. Se seleccionaron para cada muestreo la mitad de las réplicas de cada tratamiento. La tabla 2 muestra las fechas del experimento y el estado de desarrollo del cultivo.

En sendos muestreos se evaluaron in situ y en laboratorio algunos de los efectos sobre suelos y plantas. El otro proceso realizado fue la preparación y almacenaje de las muestras vegetales y de suelo a utilizar en los futuros análisis de laboratorio, que incluyen: densidad aparente, pH y conductividad eléctrica, carbono oxidable, Sólidos Volátiles totales y concentración de cationes y aniones solubles por lo que respecta a la evaluación de efectos sobre el suelo, y el análisis de la germinación, desarrollo inicial, biomasa aérea, biomasa subterránea y micorrización, cuantificación de pigmentos fotosintéticos y la determinación del estrés fotosintético en cuanto a la evaluación de los efectos sobre plantas.

Tabla 2. Calendario de muestreos realizados en el bioensayo y estado del cultivo de *Hordeum vulgare*.

Estado del cultivo	Muestreo	Fecha
Siembra	-	05/05/2011
Germinación completa	Control final de germinación (15 d)	20/05/2011
Desarrollo de la 3ª hoja	Aclareo (21 d)	26/05/2011
Inicio del encañado previo al espigado	1er muestreo plantas y suelo (42 d)	16/06/2011
Inicios de agostamiento, cosecha	2º muestreo plantas y suelo (72 d)	13/07/2011

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos sobre el suelo

Algunos de los efectos eran de esperar atendiendo al comportamiento genérico del biochar como enmienda orgánica. De esta forma, la adición de cualquier tipo de enmienda orgánica ha comportado una ligera disminución de la densidad aparente del suelo y un aumento de la capacidad de retención de agua (WHC), lo cual eran aspectos conocidos (Krull *et al.*, 2004). En el caso del biochar, la reducción en la densidad aparente se explica también porque la densidad del mismo es menor que la de los minerales presentes en el suelo, además del efecto sobre los macro y microporos (Downie *et al.*, 2009). En cuanto a la capacidad de retención de agua, se ha encontrado el mayor aumento de la misma en los tratamientos con biochar, con un 19,5% respecto al tratamiento control (OL).

Por otra parte, también es destacable el aumento de la capacidad de retención de agua provocado por la enmienda orgánica que comporta la adición de los diferentes tipos de biochar frente al producido por sus materias primas. De hecho, se han observado efectos depresores por la aplicación de las materias primas, como es la ocurrencia del fenómeno denominado “hambre de nitrógeno” en las astillas de pino y chopo (que genera inmovilización de nutrientes). También se observaron frecuentes lixiviaciones en el tratamiento con astillas de chopo.

En lo referente al estudio del pH y la salinidad, no se han observado cambios importantes en la aplicación de los diferentes tipos de biochar (observándose un ligero efecto inicial alcalinizante en el caso del pH, y una variación del mismo menor a lo largo del ensayo), y únicamente ha destacado la acidificación del suelo originada por el biochar procedente de lodos de depuradora, debido a las características conocidas del material original, y que también provocaron un aumento significativo en la salinidad de los suelos en los que se aplicó este material pirogénico.

El análisis de la concentración de cationes y aniones solubles ha permitido observar las características de los lodos de depuradora que condicionan los efectos sobre suelo y plantas de la aplicación del material original y el biochar producido. Se ha observado un elevado contenido de elementos básicos como Na, K, Mg y Ca, por otra parte muy comunes en estos materiales (Gaskin *et al.*, 2008), y el importante proceso de nitrificación de los suelos que

explicaría la acidificación de los mismos a lo largo del bioensayo. El efecto es mayor en el material original, ya que la materia prima contiene mayor concentración de NH_4^+ . Por el contrario, la acidez es menor en FL ya que el biochar de lodo tiene menor concentración de NH_4^+ debido a la volatilización de compuestos producida durante la pirólisis. Todo lo comentado se ha visto como importante, ya que determina el efector depresor sobre el desarrollo de las plantas causado por el lodo de depuradora, y que por el contrario, no se observa en el material pirolizado.

El tipo de pirólisis usado implica la producción de biochar con diferentes características físicas y químicas, siendo la granulometría y la estructura interna de las partículas aspectos relevantes. La temperatura y el tiempo de residencia de la materia prima en el proceso de pirólisis, se han comentado como los parámetros más importantes que determinan las diferentes características del biochar resultante (*Lehmann, 2007, Chan y Xu, 2009, Downie et al., 2009*). Entre otros resultados, se obtienen biochar con distinto grado de oxidabilidad, y por lo tanto, difieren en la recalcitrancia de la materia orgánica y estabilidad en los suelos donde son aplicados. En este sentido han destacado los efectos en carbono orgánico oxidable, donde se ha comprobado que las mezclas de suelo con biochar producido por pirólisis lenta son menos mineralizables en comparación a la materia orgánica de las mezclas de suelo y biochar de pirólisis rápida o gasificación.

Por último, se puede resaltar el comportamiento del único biochar procedente de gasificación utilizado en el ensayo, que difiere de los biochar producidos por pirólisis lenta y rápida. La granulometría de este tipo de biochar es diferente a la de los otros materiales pirogénicos, ya que está formado por partículas más pequeñas y con mayor proporción de cenizas, además de tener una composición química más condensada (relación H:C menor).

Podría ser interesante en un futuro profundizar acerca de la importancia de la granulometría y la estructura interna (tipo de conformación del carbono) de los distintos tipos de biochar.

Efectos sobre las plantas

No se han encontrado efectos depresores o “negativos” importantes debidos a la aplicación de los distintos tipos de biochar.

Durante el desarrollo inicial de las plantas de cebada no parece que el biochar tuviese efectos significativos. De este modo no se ha observado una influencia en la germinación final, la cual fue similar en todos los tratamientos y de aproximadamente un 90%. Tampoco se ha visto influencia en los valores de longitud de la primera hoja y biomasa de las plantas aclaradas. Por el contrario, sí fue destacable el menor desarrollo inicial de la cebada crecida en las materias primas en comparación con aquellas crecidas en tratamientos con biochar. Este aspecto ha sido especialmente comentado en los tratamientos con lodos de depuradora, los cuales causaron un efecto tóxico inicial sobre el desarrollo de las plantas que no se comprobó en la aplicación del material pirolizado.

De este modo, los valores de biomasa aérea de *Hordeum vulgare* al finalizar el ensayo han estado marcados por valores significativamente menores en los tratamientos enmendados con las materias primas, en comparación a los valores de los tratamientos biochar. La aplicación de un fertilizante mineral se ha observado como el efecto más destacable sobre el desarrollo de las plantas.

Por otra parte, se ha comprobado que la adición de enmiendas en forma de biochar (especialmente los de pirólisis lenta y rápida) conlleva una ligera mejora en el crecimiento y desarrollo de las plantas, comparado con la adición exclusiva de un fertilizante mineral.

El desarrollo de las plantas en las mezclas de suelo y astillas de chopo ha sido muy similar a lo observado en el tratamiento control sin fertilizante, destacando el menor crecimiento de las plantas y la ocurrencia de lixiviados. Por el contrario, la aplicación de astillas de pino ha sido algo más favorable para el desarrollo de la cebada. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede entender la importancia de la pirólisis de ambos tipos de astillas ya que permite eliminar los efectos depresores de la aplicación de las mismas, especialmente en el caso de las astillas de chopo.

Cuando se comparan los biochar, disminuye la importancia de las características de la materia prima, y son más relevantes las diferencias debido al tipo de pirólisis. Es probable que la realización de un bioensayo que permitiese obtener una cosecha final real permitiera observar la existencia de posibles diferencias entre estos tipos de biochar.

En el análisis de los efectos sobre la biomasa de las raíces ha destacado el comportamiento del biochar de lodo en comparación con su materia prima. La aplicación de lodos de depuradora ha causado un efecto inhibitorio sobre el desarrollo de las raíces (posiblemente por un estrés salino o bien por la presencia de amonio, metales pesados u otros compuestos orgánicos o inorgánicos, *Lehmann et al., 2011*), lo cual no se comprobó en las plantas crecidas en los tratamientos de lodos por pirólisis lenta. Este hecho, fue especialmente visible en el estudio de la relación raíces: parte aérea (*root/shoot*).

Según la bibliografía, la adición de biochar implica un estímulo de la biomasa radicular y el desarrollo de la zona del meristemo (*Lehmann et al., 2011*). En este trabajo, analizando la similitud en los valores de biomasa radicular al tratamiento control, no parece que el aporte de los distintos tipos de biochar haya permitido una mayor formación de raíces, siendo la adición de fertilizante mineral la enmienda más destacable.

En cuanto al efecto del biochar sobre la concentración de pigmentos fotosintéticos también se ha comprobado que existe un claro efecto inhibitorio o tóxico provocado por los lodos de depuradora que no se produce en la mezcla de suelo y lodo pirolizado. Este efecto depresor se ha visto que podría tener relación con la elevada concentración de nitrógeno presente en los lodos de depuradora y que no existe en el biochar. Existen estudios (*Van der Eerden & Perez-Soba 1992, Xiaoli et al., 2012*) que sugieren que un exceso de nitrógeno en el suelo ocasiona un menor desarrollo y producción de la parte aérea, ya que se produce un menor desarrollo de las raíces y actividad de las mismas, así como cambios en la relación *shoot/root* que provocan una menor capacidad de absorción de nutrientes y un desequilibrio de los mismos. El comportamiento de este material pirogénico (que podría ser más apto como enmienda para el

suelo) frente a los lodos EDAR ensayados, se ha discutido que tendría su origen en la importante volatilización de compuestos nitrogenados que se produce en el proceso de pirólisis.

Han destacado otros aspectos en el estudio de la concentración de pigmentos. Primeramente, se ha visto que el efecto directo provocado por la fertilización mineral en el desarrollo de las plantas ha sido superior al efecto indirecto generado por la aplicación de biochar. Como era de esperar, la fertilización está relacionada con la capacidad de las plantas de producir pigmentos fotosintéticos, pues elementos como el nitrógeno o el magnesio son la base para la formación de estas moléculas. En segundo lugar, pese a que los tratamientos con biochar de madera fueron mejores que sus respectivas materias primas, se ha encontrado un ligero efecto depresivo en CL, CR, FL y PL al finalizar el bioensayo en relación al tratamiento control con fertilizante mineral (OL).

La relación entre pigmentos fotosintéticos y biomasa aérea al finalizar el ensayo permite explicar algunos hechos, ya que la depresión en los valores de pigmentos de estos tratamientos no se relaciona con una menor biomasa en dichos tratamientos. También, el elevado valor de concentración de pigmentos en las plantas crecidas en lodos de depuradora no se ha correspondido con una elevada biomasa. En resumen, en el estudio de esta relación se puede observar una tendencia lineal ascendente en los tratamientos O, CO, PO, PG, OH y PR, es decir, mayor concentración de pigmentos se ha traducido en mayor biomasa. Por el contrario, se observan puntos que se salen de esta tendencia e indican por un lado una menor biomasa que lo que cabría esperar según la concentración en pigmentos (FO y OL), y la relación contraria en PL, FL, CL y CR. De esta forma se puede explicar que no necesariamente una menor concentración de pigmentos implica menor desarrollo de biomasa y producción aérea y viceversa, si bien los motivos pueden ser diversos.

En el caso del tratamiento control con fertilizante mineral (OL) cabría haber esperado una mayor producción de biomasa aérea. Los resultados en pigmentos y biomasa aérea sugieren que en este caso, el nitrógeno del suelo genera un desarrollo de las plantas que causa un desequilibrio en la nutrición de las mismas o una posible competencia entre nutrientes, lo cual no se observa en el tratamiento con el doble de fertilizante (OH) precisamente por su mayor régimen de fertilización, ni tampoco en los tratamientos con biochar, especialmente en aquellos que presentan mayor producción de biomasa aérea como los tratamientos con biochar de pirólisis lenta (PL, CL y FL), que quizás retienen algún microelemento también importante para el desarrollo de las plantas.

CONCLUSIONES

Efectos sobre el suelo

El efecto de enmienda orgánica que comporta la aplicación del biochar ha permitido observar una mejora de parámetros físicos del suelo relacionados con la producción de plantas. Como son: la densidad aparente y la capacidad de retención de agua.

La técnica de pirólisis condiciona el grado de oxidabilidad de la materia orgánica de los distintos tipos de biochar ensayados. Se ha comprobado que las mezclas de suelo y biochar producidos a partir de técnicas de pirólisis lenta son menos mineralizables que las mezclas de suelo y biochar producidos a partir de la pirólisis rápida o gasificación. Como se ha discutido, este hecho es importante para la estabilidad del carbono almacenado en el suelo.

Efectos del biochar frente a sus materias primas

Los biochar ensayados han provocado unos efectos favorables en el suelo que han facilitado un mayor desarrollo de las plantas en comparación con la aplicación de sus respectivas materias primas. Ha sido relevante el caso de los lodos de depuradora cuyo biochar ha reducido los efectos negativos en el desarrollo de las plantas de cebada que sí se observan en la aplicación del lodo original.

Interacción biochar- fertilizante mineral

La dosis baja de fertilizante mineral aplicado ha sido suficiente para el cultivo de cebada en las condiciones ensayadas.

Con una dosis baja de fertilizante mineral y la incorporación de biochar producido a partir de pirólisis lenta y rápida se ha logrado un ligero aumento de la producción de biomasa del cultivo de cebada.

Sin embargo, el efecto indirecto de la enmienda orgánica en forma de biochar sobre el desarrollo de las plantas ha sido menor que el efecto directo provocado por la fertilización mineral.

Efectos sobre plantas

La adición de las distintas enmiendas en forma de biochar al suelo no conlleva efectos inhibidores en la germinación, crecimiento y producción de las plantas de *Hordeum vulgare*.

La aplicación de los biochar procedentes de la pirólisis lenta ha comportado una ligera depresión en la concentración de pigmentos. Por el contrario, estos biochar han permitido obtener una mayor biomasa aérea, lo que sugiere que han contribuido a una mayor eficiencia en la nutrición de las plantas de cebada.

El aporte de cualquier tipo de biochar no ha tenido como consecuencia un mayor desarrollo del sistema radicular de las plantas de cebada.

Micorrización

La colonización de las raíces por hongos micorrícicos en todos los tratamientos han sido baja o inexistente, no habiéndose podido realizar un estudio comparativo. El estudio cualitativo realizado no ha permitido extraer conclusiones acerca de la colonización por micorrizas u otro tipo de hongos influida por la aplicación de biochar.

BIBLIOGRAFÍA

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, pp. 67-84.

CHENG, C., LEHMANN, J., THIES, J. E. & BURTON, S. D. (2008) "Stability of black carbon in soils across a climatic gradient ". *Geophys. Res.* 113 doi: 10.1029/2007JG000642.

FOWLES, M. (2007). "Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy". *Biomass and Bioenergy* 31, 426-432.

GARCÍA- PEREZ M., T.LEWIS, C. E. KRUGER. (2010). "Methods for Producing Biochar and Advanced Biofuels in Washington State". Part 1: Literature Review of Pyrolysis Reactors. First Project Report. Department of Biological Systems Engineering and the Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Pullman, WA, 137 pp.

GASKIN, J.W., C. STEINER, K. HARRIS, K.C. DAS, AND B. BIBENS. (2008). "Effect of lowtemperature pyrolysis conditions on biochars for agricultural use". *Transactions of the ASABE* 51: 2061-2069.

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

GLASER, B., LEHMANN, J., ZECH, W., (2002). "Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal- a review". *Biology and Fertility of Soils* 35, 219-230.

KRULL, E.S., SKJEMSTAD, J.O., BALDOCK, J.A. (2004). "Functions of soil organic matter and the effect on soil properties". En: Grain Research and Development Corporation, pp. 129. <http://grdc.com.au/uploads/documents/cso000291.pdf>

LAL, R. (2004). "Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623-1627.

LEHMANN, J., GAUNT, J. & RONDON, M. (2006). "Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems — a review". *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 403–427

LEHMANN, J. (2007a). "Bio-energy in the black". *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 381-387.

LEHMANN, JOHANNES AND JOSEPH S. (2009) *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Ed Earthscan, London, UK, 404 p.

LEHMANN J., MATTHIAS C. RILLIG, JANICE THIES, CAROLINE A. MASIELLO, WILLIAM C. HOCKADAY, DAVID CROWLEY. (2011). "Biochar effects on soil biota- a review". *Soil Biology and Biochemistry* 43 (2011) 1812-1836.

MAJOR, JULIE Ph.D (2010). "Biochar for soil quality improvement, climate change mitigations and more", a literature review.

Orientaciones varietales para las siembras de cereales en Aragón. Resultados de los ensayos, cosecha de 2011. Informaciones técnicas nº 230 (2011). Dirección General de Desarrollo Rural, Centro de Transferencia Agroalimentaria.

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, 64pp.

VAN DER EERDEN LJM, PEREZ-SOBA M. (1992). "Physiological responses of *Pinus sylvestris* to atmospheric ammonia". *Trees*, 6, 48–53.

WOOLF, D., JAMES E., AMONETTE, F., ALAYNE STREET-PERROTT, JOHANES LEHMANN Y STEPHEN JOSEPH. (2010). "Sustainable biochar to mitigate global climate change". *Natural communications* 1, art.56.

XIAOLI CHEN, PUTE WU, XINING ZHAO & SHIQING LI. (2012). "Effects of atmospheric ammonia enrichment and nitrogen status on the growth of maize". *Soil Science and Plant Nutrition*, 58:1, 32-40

IBI: www.biochar-international.org/

Información diversa acerca del biochar: www.biocharprotocol.com, www.biocharfund.org, www.biochar.org/joomla/

CSIRO: www.csiro.au

WIKIPEDIA: www.wikipedia.es

Keys to Soil Taxonomy, Eleventh Edition, 2010. United States Department of Agriculture (USDA):

<ftp://ftp->

fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/2010_Keys_to_Soil_Taxonomy.pdf