

MÁSTER EN
TECNOLOGÍAS
AVANZADAS PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE BIOCHAR Y CENIZAS EN LAS
PROPIEDADES DEL SUELO



Universidad de Valladolid

Autora: María Amparo Gilces Reyna

Tutor: Dr. Francisco Lafuente Álvarez



Universidad de Valladolid

Campus de Palencia

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS AGRARIAS

**MÁSTER EN TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA EL
DESARROLLO AGROFORESTAL**

**EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE BIOCHAR Y CENIZAS EN
LAS PROPIEDADES DEL SUELO**

María Amparo Gilces Reyna

JULIO - 2014



Agradecimiento

La gratitud es un sentimiento noble que debe anidarse en el corazón de los seres humanos. Por tal motivo expreso mi agradecimiento a algunos de los que hicieron posible la realización de este trabajo.

A Dios y a mis padres por proporcionarme la bendición, como elemento de soporte permanente, para motivarme ante las situaciones difíciles que se puedan tornar.

Al Dr. Francisco Lafuente Álvarez por la orientación oportuna en el devenir del proceso de investigación.

Mi gratitud también para con el Área de Edafología y Química de la Universidad de Valladolid, especialmente a la Dra. Belén Turrión, a Juan Carlos Arranz Morales y Carmen Blanco de Castro, por sus valiosos aportes en el desarrollo metodológico.

Un eterno agradecimiento a quienes representan el Sistema de Investigación de las Problemáticas Agrícolas en el Ecuador SIPAE, al programa Erasmus tanto en Ecuador como en España, por la oportunidad brindada. Y a esta prestigiosa universidad la cual abrió sus puertas para acogerme durante la estancia de formación contemplada.

María Amparo Gilces Reyna

Dedicado a:
Dios, mi familia y amigos.



ÍNDICE

1. RESUMEN.....	5
2. INTRODUCCIÓN.....	6
OBJETIVOS	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
MÉTODOS ANALÍTICOS	8
ESTUDIO ESTADÍSTICO.....	11
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
6. CONCLUSIONES	20
7. REFERENCIAS	20



1. RESUMEN

Los residuos vegetales, provenientes de la biomasa están siendo muy utilizados con relativo éxito por sus beneficios agronómicos, aprovechando los restos de podas y de maderas incinerados. Estos subproductos han obtenido una gran revalorización. Siendo utilizados como enmiendas sobre suelos agrícolas y forestales.

El presente estudio se basa en la aplicación de dos enmiendas: biochar obtenido a partir de la carbonización tradicional de sarmientos y cenizas de una caldera de biomasa de la fábrica Tafisa de Valladolid. Para aplicarlo a tres tipos de suelos diferentes y comprobar posibles efectos de toxicidad. Al respecto se plantearon los siguientes objetivos:

Determinar efecto de la aplicación a tres suelos con propiedades contrastadas de pH y textura, de dos dosis de biochar y dos dosis de ceniza sobre algunas propiedades químicas y biológicas del suelo como son: pH, conductividad eléctrica, fósforo asimilable, carbono y nitrógeno total, carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, respiración del suelo y estudio de la cinética de mineralización del carbono.

Determinar el posible efecto fitotóxico de la aplicación de biochar y ceniza al suelo, mediante pruebas de germinación en extracto acuoso y en sustrato de semillas de lechuga.

La realización de este trabajo tuvo lugar en el Área de Edafología y Química Agrícola de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia.

En respuesta a los parámetros estudiados la influencia en el pH mostró un efecto alcalinizante tanto de las cenizas como del biochar, de forma más marcada en este último. El incremento de pH del suelo fue proporcional a la dosis de enmienda. Los mayores incrementos de pH se dieron en el suelo ácido y neutro. En cuanto al P asimilable, éste aumentó en los tres suelos estudiados, para la mayoría de los tratamientos.

Respecto a la respiración microbiana fue mayor en el suelo neutro durante el periodo de incubación, la velocidad de mineralización obtenida en los ajustes mejoró notablemente para dosis altas de biochar. Mientras que los resultados obtenidos para dosis equivalentes de cenizas son significativamente más bajos. Las dosis bajas tanto de cenizas como de biochar no presentaron diferencias significativas.

En las pruebas de germinación, el extracto acuoso de biochar en proporción 1:10, dio peores resultados que el blanco (agua destilada), sobre todo en longitud de raíz, mientras que en el extracto de ceniza la germinación obtuvo un comportamiento mejor respecto al biochar y similar al testigo. En todo caso las diluciones, respecto del extracto 1:10, tanto de biochar como de ceniza efectuadas mostraron una mejor respuesta de germinación.

En el ensayo con sustrato sólido, en los tres tipos de suelos con diferentes tratamientos, la adición de biochar mejora la germinación y crecimiento del tallo, sobre todo para el suelo ácido, incluso en dosis altas. Para el caso de la ceniza la mejora fue menor.

Se observaron también en las mezclas con biochar, indicios de mejora en propiedades físicas, aunque éstas no se estudiaron en este trabajo.



2. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida la capacidad de usos a los que el hombre los sujeta. Conservar los suelos para preservar la especie es una necesidad imperiosa para aportarle a una agricultura sustentable que garantice la soberanía alimentaria (Guillén, 2013) Teniendo en cuenta factores como la calidad del suelo, la cual se define como la capacidad para funcionar, dentro de las fronteras del ecosistema y el uso de la tierra, manteniendo la calidad ambiental y fomentando el desarrollo de las plantas, los animales y el ser humano (Duran, 2007).

El ser humano ha mecanizado y explotado irracionalmente muchos de los sistemas de cultivo. Ha especializado la producción y simplificado la gestión. La mayoría de estos cambios han aportado beneficios socioeconómicos, pero se ha perdido de vista lo que les está ocurriendo a los suelos. Las prácticas agrícolas, en su mayoría desvinculadas del mantenimiento del suelo, han influido decisivamente en el aumento del desmedro de este recurso. El biocarbón tiene su origen en la transformación mediante la combustión incompleta o parcialmente anaeróbica (pirólisis) de biomasa a temperaturas de 350-500°C, lo que produce energía y un carbón vegetal rico en carbono, que se devuelve al suelo (Mayor, 2010; Abenza, 2012). Este carbón obtenido se procesa para obtener un producto de grano fino y poroso que toma el nombre de biochar. Reconocido por sus beneficios agronómicos y potencial de secuestro de carbono. Los beneficios del biochar aplicado al suelo se han atribuido a la disminución en la densidad aparente, la mejora de la dinámica del agua al modificar la estructura del suelo, aumenta la capacidad de intercambio catiónico (Woolf, 2010; Sardar, 2014). Otros estudios mencionan la capacidad que tiene el biochar para reducir la lixiviación y la escorrentía superficial, aumentar el pH del suelo, así como la absorción de pesticidas y metales pesados (Mayor, 2010; Abenza, 2012). Siendo visto el biochar como una importante enmienda para suelos, incidiendo en la lucha contra la pérdida de suelo forestal y agrícola, mejorando su fertilidad y evitando su empobrecimiento (Lehmann, 2009). Sin embargo la mayor parte de las experiencias realizadas hasta el momento se han llevado a cabo en suelos ácidos.

Las cenizas procedentes de la combustión completa de la madera son también utilizadas como fertilizantes, pues son ricas en elementos esenciales para las plantas. Por lo que su devolución al suelo contribuye a completar el ciclo natural de los nutrientes (Steenari & Lindqvist, 1997; Karlton, 2008).

La adición de ceniza a los suelos podría afectar las propiedades físicas del suelo tales como la estructura, la distribución de poros y la densidad con implicaciones directas en la aireación del suelo, y por lo tanto, podría incrementar la permeabilidad hídrica así como su capacidad de retención de agua minimizando así los impactos de la escorrentía superficial.

A parte de estas consideraciones, la aplicación de cenizas de madera en suelos podría presentarse como una forma prometedora de revalorización de este residuo forestal, y como alternativa a su transporte a vertederos, sobre todo en zonas donde el paisaje forestal está caracterizado por plantaciones de especies de gran interés por el sector maderero (Guillén, 2013).

En virtud de lo referido anteriormente se denota la necesidad de adelantar estudios que conlleven a la aplicación de prácticas en el aprovechamiento de la biomasa vegetal a fin de favorecer las condiciones del suelo.



OBJETIVOS

De forma general se pretende determinar los efectos de la aplicación de biochar y cenizas de biomasa en las propiedades de tres suelos con propiedades contrastadas de pH y textura.

Más concretamente, se pretende estudiar los efectos sobre el pH, fósforo asimilable, respiración del suelo, cinética de mineralización del carbono y carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana.

Se busca también determinar el posible efecto fitotóxico de estas enmiendas, mediante pruebas de germinación comparando el extracto acuoso y el sustrato proveniente de los tres tipos de suelos con dosificaciones de biochar y ceniza.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES

Las muestras de los suelos considerados provienen de tres tipos de suelo según pH y textura: básico, ácido y neutro, con texturas franco arcillo arenosa, franco arenosa y franco arcillosa respectivamente. Su procedencia es Ampudia (en ladera de páramos calizos), Rañas del Norte de Palencia y Campiña de Segovia respectivamente (localización general en Figura 1). Dichas muestras fueron tomadas en diferentes puntos a una profundidad de 0 a 20 cm y tamizadas a 2 mm.

El biochar se obtuvo a partir de la combustión incompleta o carbonización de sarmientos, basada en la técnica tradicional de obtención del denominado “cisco” de encina, usado para braseros. Para ello se formó una pila, que se prendió por su parte inferior, a la que se iban añadiendo sarmientos desde las zonas que no habían alcanzado las llamas o desde fuera, con el fin de evitar que las llamas alcanzaran gran desarrollo y quemasen en exceso los sarmientos; una vez que la mayoría de los sarmientos había sido alcanzados por las llamas y transformados en una pila de ascuas, se procedió a apagarlas con agua. Ya en el laboratorio, tras secarlo, se molió en mortero de vidrio y tamizó a 0,2 mm, para su mejor incorporación al suelo. La ceniza que se utilizó fue la de la caldera de biomasa (corteza y restos de madera) de la fábrica Tafisa de Valladolid, una vez secada al aire y tamizada a 2 mm (fue tamizada antes de secarse completamente para evitar la formación de polvo).

Para estudiar el efecto de la aplicación de cenizas y biochar al suelo se prepararon en el laboratorio mezclas de estas enmiendas con los tres tipos de suelo, en dos dosis: 0,75 % y 1,5 %, equivalentes a 20 y 40 t/ha respectivamente (considerando una profundidad de suelo de 20 cm y densidad de 1,35 kg/L).

Tabla: 1 Principales características de los suelos y enmiendas empleados

Muestra	Capacidad de campo	Humedad higroscópica	pH	Textura	C (%)	N (%)	C/N	P Olsen (mg/kg)
Suelo básico	37,80%	1,40%	8,0	Franco arcillo arenosa	1,6	0,15	10,6	11
Suelo ácido	32,70%	0,80%	4,95	Franco arenosa	1,8	0,12	14,5	35
Suelo neutro	60,90%	1,80%	7,6	Franco arcillosa	0,62	0,071	8,8	27
Biochar	73,70%	4,60%	9,6	-	72	0,83	88	612
Ceniza	32,00%	0,20%	10,6	-	1,1	0	-	176



Figura 1. Mapa de localización de la procedencia de las muestras de suelo

MÉTODOS ANALÍTICOS

Para la caracterización de los materiales y ensayo de algunas de sus propiedades físicas, se realizaron diversos: humedad higroscópica, pH, capacidad de campo, conductividad eléctrica, concentración de carbonatos, carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, como se describen a continuación, en las muestras incubadas para determinar actividad respiratoria.



Figura 2. Muestras de suelos (A: ácido, B: básico y N: neutro), biochar y cenizas (C)

CAPACIDAD DE CAMPO y HUMEDAD HIGROSCÓPICA

Se determinó la capacidad de campo tras saturación por acenso capilar y drenaje libre. Tras ello se llevó a estufa a 105-110 °C una muestra tomada de la dona intermedia del nivel de suelo en el tubo, igual que para determinar humedad higroscópica de la muestra secada al aire.

Estos resultados permitieron determinar las condiciones de humedad adecuadas para los ensayos de respiración microbiana y germinación en sustrato sólido.

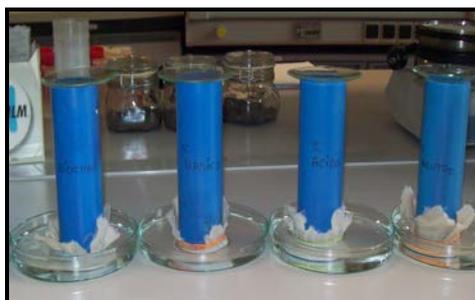


Figura 3. Saturación de humedad de los suelos

pH y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO

Se pesaron 20 g de las muestras de suelo y cenizas y se añadieron en un vaso de precipitado 50 mL de agua destilada, se agitó la suspensión obtenida durante unos 10 minutos y a continuación se midió el pH, habiendo agitado la suspensión antes de sumergir el electrodo. Para determinar el pH del biochar se tomaron 2 g de muestra y añadieron 25 mL de agua.

La conductividad se midió en el mismo vaso de la medida de pH tras 15 minutos en reposo.



Figura 4. Medida del pH

CARBONATOS

Basado en el método gasométrico con el Calcímetro de Bernard, de medida de volúmenes de CO_2 desprendidos al reaccionar los carbonatos con ácido, comparándose los resultados con un patrón de carbonato cálcico.

FÓSFORO ASIMILABLE (método Olsen, 1954)

Se basa en la extracción con disolución de bicarbonato sódico 0,5 M ajustada a pH 8,5 y posterior determinación colorimétrica del fosfato solubilizado mediante el método de Murphy y Riley (1962).



Figura 5. Medida del Fosforo asimilable

CARBONO Y NITRÓGENO DE LA BIOMASA MICROBIANA

Se utilizó el método de fumigación-extracción según Vance et al. (1987). Este método consta de tres fases: fumigación con cloroformo libre de etanol, extracción con K_2SO_4 0,5M de muestras fumigadas y sin fumigar y determinación analítica del C del N extraídos de la biomasa microbiana. En los extractos resultantes se determina la concentración de C mediante el analizador TOC SKALAR o mediante oxidación con dicromato potásico.



Figura 6. Fumigación de muestras

ACTIVIDAD RESPIRATORIA DEL SUELO (Método de Isermeyer, 1952).

Se determinó CO_2 desprendido durante la incubación del suelo, en un sistema cerrado, atrapándolo en una disolución de NaOH, valorándose el exceso de NaOH con HCl, previa precipitación con cloruro de bario del carbonato formado. Se tomaron 80 g de muestra tanto de los suelos testigo como de cada una de las mezclas de estos con cenizas y con biochar. En ambos casos se probaron dos dosis: 0,75 % y 1,5 %. Se incubaron al 60 % de su capacidad de campo, a una temperatura de 29°C durante 49 días, determinándose el CO_2 desprendido a 3, 7, 13, 20, 30 y 49 días. Todo el ensayo de respiración se realizó por cuadruplicado. Para el caso del suelo ácido se determinó la producción de CO_2 debida a la reacción de los carbonatos existentes en las cenizas y el biochar para no considerarlo como respiración microbiana; dicho valor se descontó del dato de CO_2 desprendido en la primera medida.

Los datos experimentales obtenidos se ajustaron a un modelo de cinética de mineralización de primer orden (Murwira et al, 1990) y a una doble exponencial (Delphin, 1988), que se corresponden con las siguientes ecuaciones:

$$C_t = C_0 \cdot (1 - e^{-kt}) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$C_t = C_1 \cdot (1 - e^{-h_1 t}) + C_2 \cdot (1 - e^{-h_2 t}) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde C_t es el carbono mineralizado acumulado en un tiempo t medido en mg C- CO_2 / kg suelo; t es el tiempo en días desde el comienzo de la incubación, C_0 , C_1 y C_2 (en mg C- CO_2 / kg suelo), representan la cantidad de carbono mineralizable, C_0 para un modelo de primer orden y en el caso de la cinética doble exponencial C_1 y C_2 se corresponden con el pool rápida y lentamente mineralizable respectivamente y, finalmente, k , h_1 y h_2 son constantes de descomposición en (día^{-1}).



Figura 7. Incubación de las muestras

GERMINACIÓN EN EXTRACTO ACUOSO Y EN SUSTRATO

Para comprobar el posible efecto fitotóxico del biochar y cenizas se utilizó el método propuesto por el IBI (2013) con germinación de semillas de lechuga en extracto acuoso. Se probó un extracto acuoso 1:10 p/v y diluciones del mismo 1:10 y 1:100. Se utilizó como blanco agua destilada. Se colocaron en placas petri con una base de papel filtro obteniéndose C, C1, C2; B, B1, B2 en caja petri humedecida con los extractos, en ellas colocamos 40 semillas de lechuga y éstas fueron llevadas a un lugar oscuro donde permanecieron 3,5 días en proceso de germinación a una temperatura en torno a 20°C. Después de este periodo de tiempo se realizó el respectivo registro, tanto del porcentaje de semillas germinadas como de longitud de la raíz.

Los ensayos en sustrato (mezclas de suelo y enmiendas) se realizaron también con semillas de lechuga, realizándose 3 repeticiones por tratamiento. Se colocaron 17 g de suelo y mezclas en placas Petri, incubándolas durante 12 días a un 60 % de la capacidad de campo en invernadero a temperatura ambiente; fue necesario ir reponiendo de forma periódica la humedad perdida con agua destilada; se utilizaron 30 semillas en el registro de germinación y 15 en el de medidas de longitud del tallo.



Figura 8. Germinación en extracto acuoso y en sustrato

ESTUDIO ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los resultados se realizó con el paquete Statgraphics Centurion XVI mediante un Modelo Lineal General (GLM). Se compararon, para cada tipo de suelo empleado, en conjunto los datos del testigo con los cuatro tratamientos (biochar y cenizas en dos dosis), utilizando el test de Fisher LSD con una significación del 95 % (p valor $<0,05$). Previamente se comprobó la normalidad y la homocedasticidad de los residuales mediante el test de Kolmogorov-Smirnov (interpretación gráfica) y el test de Levene, respectivamente. El ajuste de las curvas de mineralización se llevó a cabo utilizando el programa SPSS 15.0.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

pH y CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

**Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo**Tabla: 2 Valores medios de pH y conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$

Tratamiento	Suelo Básico		Suelo Ácido		Suelo Neutro	
	pH	C.E.	pH	C.E.	pH	C.E.
Testigo	8,0 b	381,0 b	4,8 d	137,0 c	7,6 c	231,0 ab
Cenizas 0,75%	7,9 b	398,0 ab	4,9 cd	174,0 b	7,7 b	260,5 a
Cenizas 1,5%	7,9 b	425,0 a	5,0 bc	222,0 a	8,0 a	201,3 b
Biochar 0,75%	8,2 a	415,0 ab	5,1 b	175,0 b	8,1 a	229,0 ab
Biochar 1,5%	8,2 a	380,0 b	5,4 a	219,0 a	8,4 a	245,3 ab

Nota: Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos

Respecto a la influencia en el pH, se observó un efecto alcalinizante tanto de las cenizas como del biochar, de forma más marcada en este último. Esto es debido a la presencia de carbonatos en ambas enmiendas (en las determinaciones realizadas se encontraron contenidos de carbonatos, expresados como CaCO_3 , de 2,4 % en las cenizas y 5,3 % en el biochar) Salvo en el suelo básico, el incremento de pH del suelo fue proporcional a la dosis de enmienda. Los mayores incrementos de pH se dieron en el suelo ácido y neutro. Verheijen (2009) recoge que la mayoría de biochars tienen pH neutro a básico y que muchos experimentos de campo muestran un aumento en el pH del suelo después de la aplicación del biochar cuando el pH inicial fue bajo (Omil et al. 2007). En suelos alcalinos esto puede ser indeseable. Efectos de encalado sostenidos en suelos de pH ácido necesitarían de aplicaciones regulares (Cheng, 2008).

En los datos obtenidos para la conductividad eléctrica, las dos enmiendas dieron incrementos no preocupantes, más apreciables en general para las cenizas y en el suelo ácido, con valores más bajos de partida.

CARBONO Y NITRÓGENO DE LA BIOMASA MICROBIANA

Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 3.

Tabla: 3 Valores medios de nitrógeno y carbono microbiano mgC/kg suelo

Tratamiento	Suelo Básico		Suelo Ácido		Suelo Neutro	
	C.mic	N.mic	C.mic	N.mic	C.mic	N.mic
Testigo	492 b	33,9 a	123 a	29,8 a	198 a	9,3 a
Cenizas 0,75 %	503 b	44,2 a	129 a	26,5 a	207 a	8,3 a
Cenizas 1,5 %	567 a	56,0 a	122 a	21,7 a	177 a	9,7 a
Biochar 0,75 %	511 b	41,5 a	154 a	22,9 a	160 a	13,5 a
Biochar 1,5 %	519 b	32,9 a	142 a	19,0 a	207 a	13,9 a

Nota: Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos

No se observaron diferencias significativas tanto en C como en N microbianos, salvo en el suelo ácido con un efecto favorable en la dosis de ceniza 1,5 %, que podría tener relación con el efecto neutralizante mencionado, lo que favorecería la actividad bacteriana.

En la bibliografía se encuentran tanto cambios significativos en la actividad microbiana por efecto de la adición de biochar (Steiner et al., 2008), aunque inapreciables a largo plazo (Rutigliano et al. 2013).



FOSFORO ASIMILABLE

Los resultados del análisis con el método anteriormente descrito, permite obtener la Tabla 4.

Tabla 4. Valores medios de fósforo asimilable

Tratamiento	Suelo Básico	Suelo Ácido	Suelo Neutro
Testigo	11,2 b	34,6 bc	26,6 c
Cenizas 0,75%	11,5 b	36,4 a	28,4 b
Cenizas 1,5%	14,0 a	35,6 ab	30,4 b
Biochar 0,75%	13,5 a	35,9 a	29,0 b
Biochar 1,5%	14,6 a	33,6 c	35,2 a

Nota: Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos

Los niveles de partida en los suelos son medio-bajo para el suelo básico y muy alto para el suelo ácido y neutro.

En general podemos observar un aumento del fósforo asimilable con la aplicación de ambas enmiendas, pero sin un efecto proporcional de la dosis, lo que podría deberse al cambio de pH que provocan, que puede condicionar la solubilidad del P del suelo.

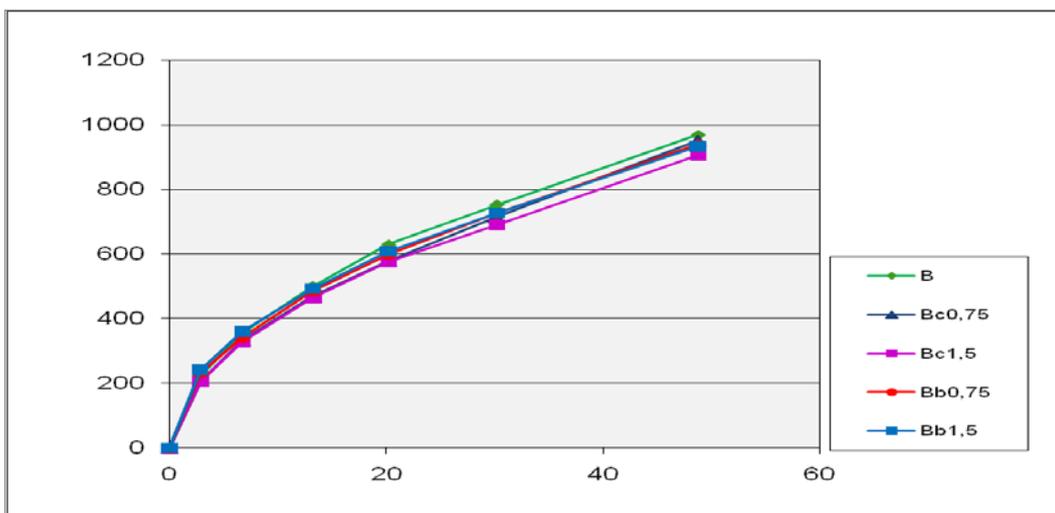


Figura 9. Curvas de C respirado en suelo básico

RESPIRACION MICROBIANA y CINÉTICAS DE MINERALIZACIÓN

Para los tres tipos de suelos y las enmiendas añadidas se obtuvieron buenos ajustes tanto para la cinética de primer orden como para la doble exponencial con valores de r^2 en todos los casos superiores a 0,9. En la figura 8 se muestran las curvas de mineralización correspondientes al suelo básico y las correspondientes adiciones de enmiendas ensayadas, curvas similares se obtuvieron para el suelo ácido y el neutro.

En la tabla 5 podemos observar que en el suelo básico no hay diferencias significativas al 95% en el C respirado al cabo de 49 días entre el suelo testigo y los suelos con enmiendas. En los coeficientes de la ecuación exponencial de ajuste sí se observaron diferencias significativas para C_0 , indicativo del pool de C fácilmente mineralizable y para k , indicativo de

Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo

la velocidad de mineralización. En el caso del suelo básico la adición de cenizas y biochar ralentiza la mineralización del C del suelo posiblemente debido a que el pH de partida del suelo es ya elevado y la adición de las enmiendas que son claramente básicas no lo mejora, además este suelo es el que posee una CE más alta y con la adición de las enmiendas se ve incrementada pudiendo resultar perjudicial para la actividad de los microorganismos edáficos.

Tabla 5. Valores medios en suelo básico de C respirado a 49 días y coeficientes de las curvas de ajuste. C_r 49 días, C_o , C_1 y C_2 en mg C-CO₂/kg suelo, k, h_1 y h_2 en día⁻¹.

Tratamiento	C_r 49días	$C = C_o (1 - e^{-kt})$		$C = C_1 (1 - e^{-h_1 t}) + C_2 (1 - e^{-h_2 t})$			
		C_o	k	C_1	h_1	C_2	h_2
Testigo	970 a	996 a	0,053 c	227 a	0,43 b	1238 b	0,019 a
Cenizas 0,75%	952 a	933 b	0,059 ab	250 a	0,35 ab	2275 a	0,009 b
Cenizas 1,5%	906 a	931 b	0,054 ab	247 a	0,35 b	1691 ab	0,012 b
Biochar 0,75%	940 a	964 ab	0,048 ab	223 a	0,43 ab	1239 b	0,017 a
Biochar 1,5%	934 a	933 b	0,054 a	237 a	0,52 a	1165 b	0,018 a

Nota: Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos

En el suelo ácido, tal como se observa en la tabla 6, la adición de biochar provoca diferencias significativas en la velocidad de mineralización (k), obteniéndose para todas las enmiendas valores significativamente más altos que para el suelo testigo cuando se ajustan los datos a una cinética de primer orden. Este hecho posiblemente sea debido a que la adición tanto de las cenizas como del biochar al suelo ácido origina un incremento de pH que pasa de 4,8 a más de 5,0 en la mayoría de los casos, lo cual mejora las condiciones en las que se van a encontrar los microorganismos del suelo y por lo tanto se incrementa su actividad. Los parámetros obtenidos del ajuste a una cinética doble exponencial no mostraron diferencias significativas entre suelos con enmiendas y el testigo.

Tabla 6. Valores medios en suelo ácido de C respirado a 49 días y coeficientes de las curvas de ajuste. C_r 49 días, C_o , C_1 y C_2 en mg C-CO₂/kg suelo, k, h_1 y h_2 en día⁻¹.

Tratamiento	C_r 49días	$C = C_o (1 - e^{-kt})$		$C = C_1 (1 - e^{-h_1 t}) + C_2 (1 - e^{-h_2 t})$			
		C_o	k	C_1	h_1	C_2	h_2
Testigo	741 a	815 a	0,045 c	195 a	0,34 a	1039 a	0,021 a
Cenizas 0,75%	727 a	783 a	0,053 b	232 a	0,23 a	1036 a	0,017 a
Cenizas 1,5%	738 a	785 a	0,063 b	198 a	0,37 a	834 a	0,023 a
Biochar 0,75%	760 a	799 a	0,067 b	296 a	0,26 a	910 a	0,021 a
Biochar 1,5%	760 a	821 a	0,082 a	299 a	0,42 a	812 a	0,021 a

Nota: Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos

Como se puede observar en la tabla 7 el suelo neutro con tratamiento de biochar mostró mayor tasa de respiración hasta el día 49 que el testigo, en cuanto a la cinética de mineralización se puede ver que la velocidad de mineralización (k) obtenida en el ajuste a una cinética de primer orden muestra valores significativamente más bajos cuando al suelo se le añade la dosis de cenizas alta y valores significativamente más altos cuando se le añade biochar en la dosis alta. Las dosis bajas tanto de cenizas como de biochar no presentaron diferencias significativas ni para k ni para C_o .

Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo

En el ajuste a la cinética de mineralización doble exponencial se observa que para las dosis bajas de cenizas y del biochar no hay diferencias significativas con el testigo en ninguno de los dos pools de C diferenciados por el modelo, ni en sus velocidades de mineralización, ni en sus concentraciones, resultado similar al obtenido con la cinética de primer orden. Sin embargo la dosis más alta de cenizas originó un incremento significativo en la concentración de C del pool más estable con una velocidad de mineralización significativamente más baja. En el caso del biochar, la dosis más alta originó una disminución significativa del pool de C más estable y un aumento significativo en su velocidad de mineralización en comparación con el suelo testigo.

El incremento observado con la dosis más alta de biochar podría ser debido a que el suelo neutro es el que posee un valor más bajo de C y la adición del biochar aunque la proporción sea pequeña origina un incremento significativo en su contenido en C.

Tabla 7. Valores medios en suelo neutro de C respirado a 49 días y coeficientes de las curvas de ajuste. C_r 49 días, C_o , C_1 y C_2 en mg C-CO₂/kg suelo, k , h_1 y h_2 en día⁻¹.

Tratamiento	C_r 49 días	$C = C_o (1 - e^{-kt})$		$C = C_1 (1 - e^{-h_1 t}) + C_2 (1 - e^{-h_2 t})$			
		C_o	k	C_1	h_1	C_2	h_2
Testigo	639 a	660 a	0,053 b	169 a	0,39 ab	920 ab	0,015 b
Cenizas 0,75%	595 ab	612 a	0,054 b	171 a	0,17 b	1014 ab	0,013 b
Cenizas 1,5%	556 b	624 a	0,042 c	188 a	0,35 c	1352 a	0,002 c
Biochar 0,75%	644 a	648 a	0,060 b	190 a	0,30 bc	830 ab	0,016 b
Biochar 1,5%	646 a	622 a	0,074 a	192 a	0,52 a	706 b	0,022 a

Nota: Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos

En el ajuste de la cinética doble exponencial, para los tres suelos estudiados los valores obtenidos para C_1 son del orden de casi diez veces menores que los de C_2 teniendo por tanto en todos los casos menor concentración el pool rápidamente mineralizable (C_1) que el pool de mineralización más lenta (C_2). Esta proporción se mantiene también en el caso de los suelos con enmiendas. Sin embargo, en relación a las tasas de descomposición observamos que es mucho mayor la correspondiente al pool más lábil (k) que la del pool más recalcitrante (h). Por ello podemos decir que $k \gg h$ como también afirmaron Contreras et al. (2006) y los autores Bernal et al. (1998) y Glaser et al. (2001).

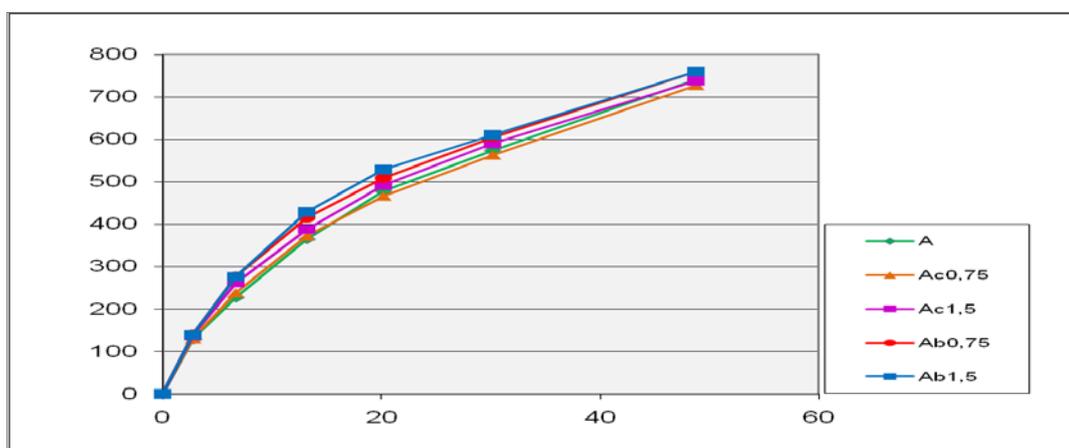


Figura 10. Curvas de C respirado en suelo ácido

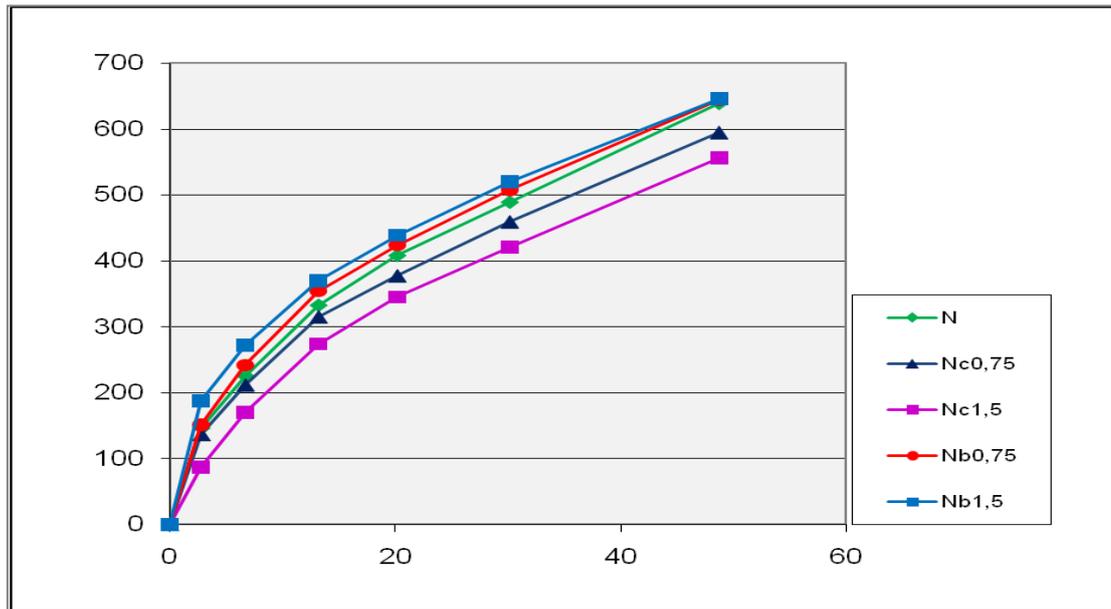


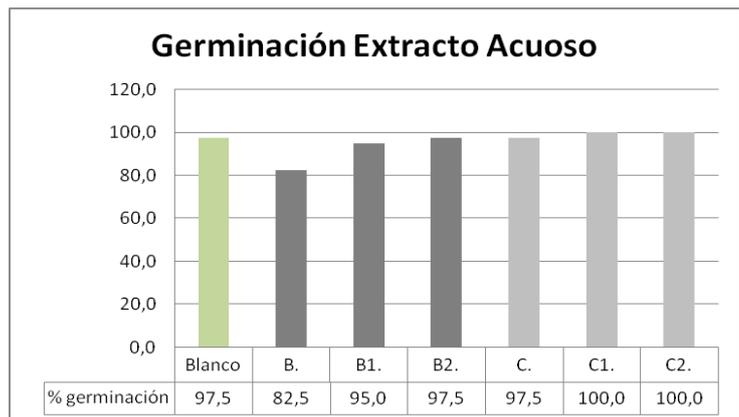
Figura 11. Curvas de C respirado en suelo neutro

GERMINACIÓN EN EXTRACTO ACUOSO

Los resultados obtenidos en la prueba biológica basada en la germinación en extracto acuoso se muestran en la tabla 8 (germinación) y 9 (crecimiento de la raíz).

Tabla 8 y Figura 12. Valores medios de % de germinación en extracto acuoso

Germinación Extracto Acuoso		
Muestra	Semillas Germinadas	% germinación
Blanco	39	97,5
B	33	82,5
B1	38	95,0
B2	39	97,5
C	39	97,5
C1	40	100,0
C2	40	100,0



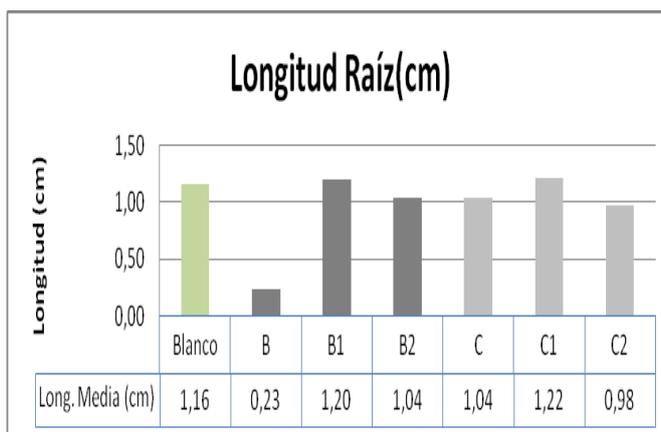
El biochar en extracto acuoso presentó una germinación menor que el blanco (agua destilada). Mientras que la ceniza tiene unos resultados similares al blanco.



Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo

Tabla 9 y figura 13. Valores medios de longitud de raíz en extracto acuoso

Longitud Raíz		
Muestra	Media	Desviación estándar
Blanco	1,16	0,22
B	0,23	0,09
B1	1,20	0,24
B2	1,04	0,26
C	1,04	0,40
C1	1,22	0,33
C2	0,98	0,27



Podemos ver que en el caso de mayor concentración de biochar la longitud de la raíz es mucho menor que en el Blanco. Sin embargo, este efecto desaparece en las diluciones 1:10 (B1) y 1:100 (B2) del extracto original. Las diluciones intermedias tanto de biochar como de ceniza (B1 y C1) dieron los valores máximos, posiblemente por el aporte de nutrientes.

GERMINACIÓN EN SUSTRATO

Los ensayos en los tres tipos de suelos con diferentes tratamientos mejoran la germinación en el caso del biochar, sobre todo para el suelo ácido. Para el caso de la ceniza la mejora es mucho menor, llegando en el caso del suelo neutro a reducir el porcentaje de germinación con respecto al suelo sin tratamiento.

Tabla 10 y figura 14. Valores medios de germinación en suelo básico.

Germinación en Suelo Básico		
Muestra	Semillas Germinadas	% germinación
B	15	50,7
Bb0,75	25	83,3
Bb1,5	23	76,7
Bb3,0	23	76,7
Bb6,0	21	70,6
Bc0,75	15	51,3
Bc1,5	17	57,2

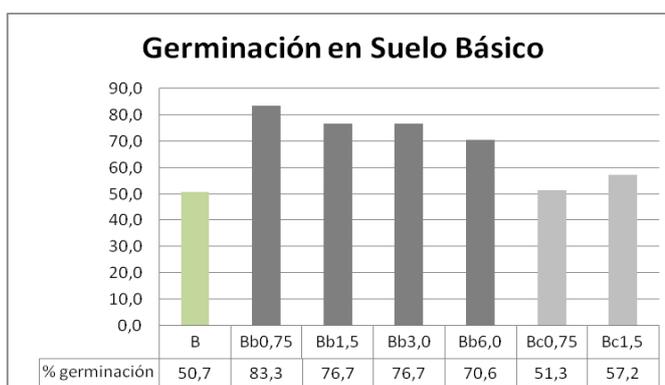
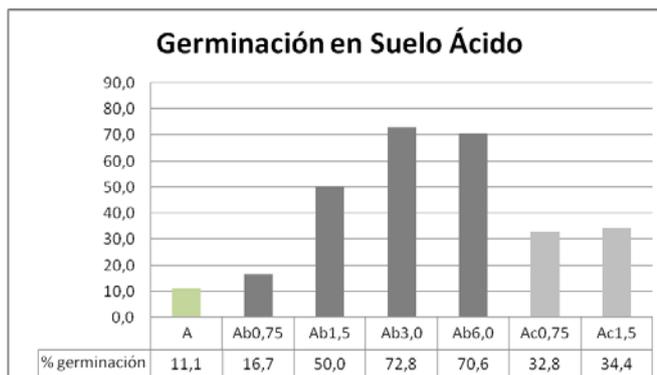


Tabla 11 y figura 15. Valores medios de germinación en suelo ácido.

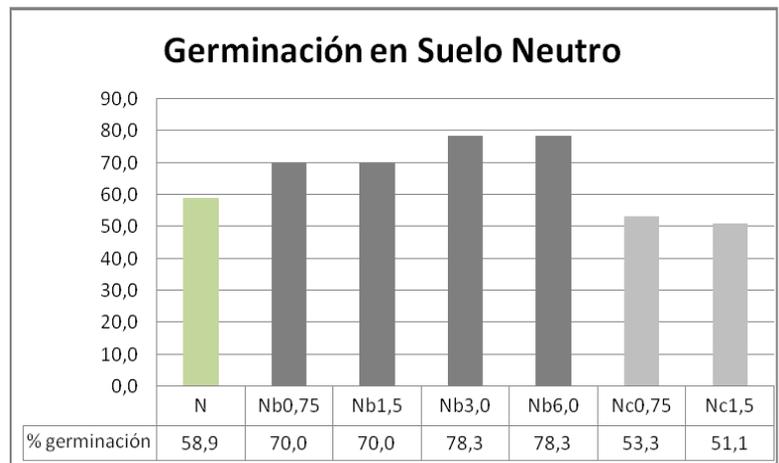
Germinación en Suelo Ácido		
Muestra	Semillas Germinadas	% germinación
A	3	11,1
Ab0,75	5	16,7
Ab1,5	15	50,0
Ab3,0	22	72,8
Ab6,0	21	70,6
Ac0,75	10	32,8
Ac1,5	10	34,4



Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo

Tabla 12 y figura 16. Valores medios de germinación en suelo neutro.

Germinación en Suelo Neutro		
Muestra	Semillas Germinadas	% germinación
N	18	58,9
Nb0,75	21	70,0
Nb1,5	21	70,0
Nb3,0	24	78,3
Nb6,0	24	78,3
Nc0,75	16	53,3
Nc1,5	15	51,1



LONGITUD DEL TALLO DE LA PLANTA EN SUSTRATO

En la figura 17 se muestran los resultados de las medidas de longitud del tallo.

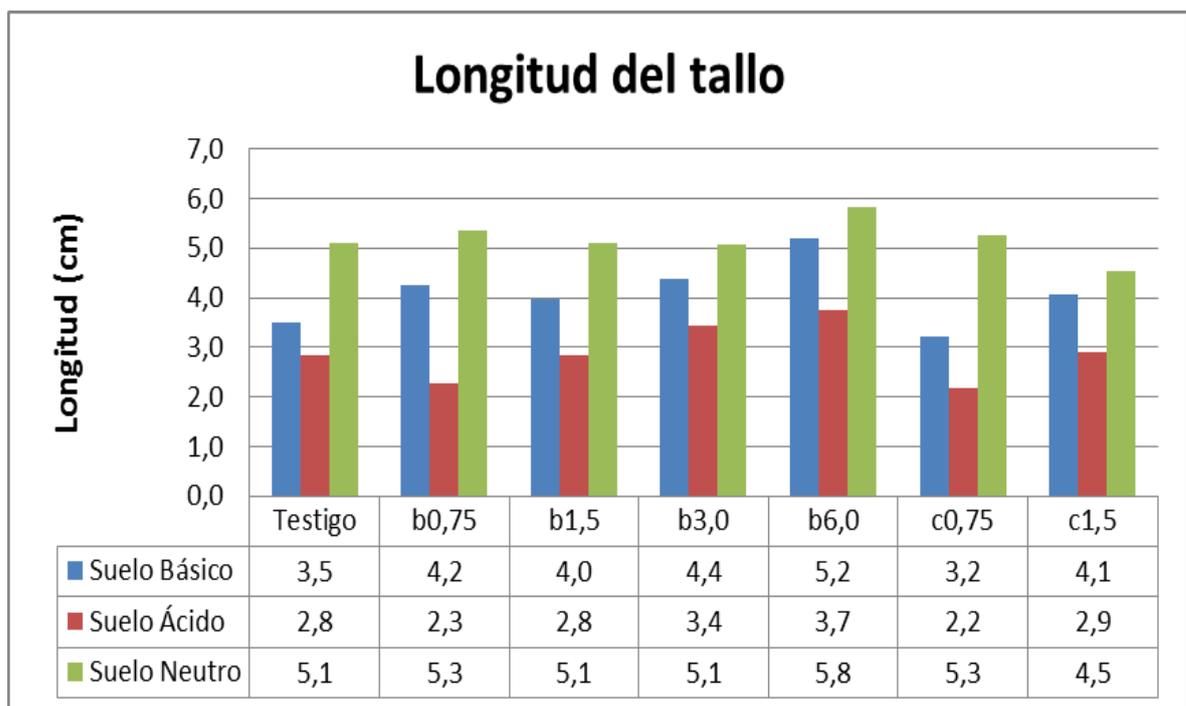


Figura 17. Gráfica y datos de la longitud del tallo de la planta en sustrato sólido

En el suelo básico el biochar mejora la longitud del tallo de la planta para todas las dosis, mucho más que las cenizas. Para el suelo ácido solo las dosis altas de biochar mejoran la longitud del tallo. Se puede observar que para el suelo neutro, la dosis con el biochar al 6% presenta una mejora apreciable de la longitud del tallo.

DIAMETRO DE LA HOJA EN SUSTRATO

En la figura 17 se muestran los resultados de las medidas de diámetro de hoja.

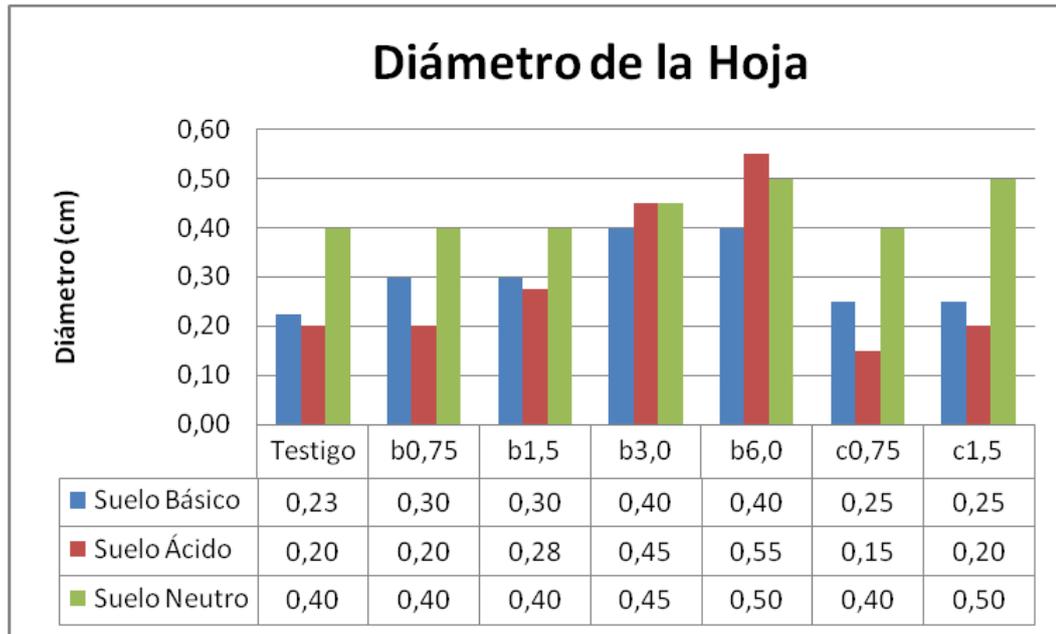


Figura 18. Gráfica y datos del diámetro de la hoja

Se observó la misma tendencia que para la longitud de las plantas. En el suelo básico el biochar mejora el diámetro de la hoja para todas las dosis, mucho más que la ceniza. Para el suelo ácido solo las dosis altas de biochar mejoran el diámetro de la hoja. Se observó que para el suelo neutro, excepto con el biochar al 6 % y cenizas 1,5 %, ninguno de los tratamientos presenta una mejora apreciable del diámetro de la hoja. Esto puede deberse al alto valor mostrado por este suelo sin enmendar.

La dosis más alta de biochar fue por tanto la que mejor comportamiento mostró en los parámetros de tamaño de planta, indicando que en mezcla con el suelo muestra un claro efecto favorable en todos los suelos estudiados. Mejoras en el rendimiento de lechuga por aplicación de biochar han sido encontradas también por Upadhyay et al (2014).



6. CONCLUSIONES

A partir de los datos experimentales obtenidos podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- La adición del biochar y cenizas utilizados mejoraron en general las propiedades químicas estudiadas del suelo. Aumentó la disponibilidad de P asimilable. Se favorecieron las condiciones del pH en el suelo ácido, mientras que en los suelos básico y neutro el aumento de pH no dio problemas destacables en otros parámetros estudiados.
- En parámetros microbiológicos no hubo en general diferencias significativas; se puede destacar en el suelo neutro un aumento en la velocidad de mineralización con la dosis alta de biochar.
- A pesar del efecto desfavorable del biochar en extracto acuoso en proporción 1:10 sobre la tasa de germinación de lechuga y crecimiento de la raíz, el comportamiento en mezclas con suelo fue muy favorable, incluso en dosis elevadas, a lo que pudo contribuir su aporte de nutrientes y una mayor cantidad de la luz solar absorbida gracias a su color oscuro.

7. REFERENCIAS

- Abenza, D. (2012). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta, Proyecto fin de carrera en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Bernal, M.P.; Sánchez-Monedero, M.A.; Paredes, C.; Roig, A. (1998). Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil. *Agriculture. Ecosys. Environ*, 69; 175-189.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Engelhard, M. (2008) Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 1598-1610
- Contreras, F.; Paolini, J.; Rivero, C. (2006). Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre la cinética de mineralización del carbono en suelos del municipio Rivas Dávila, estado de Mérida, Venezuela.
- Delphin, J. E. (1988). Utilisation de cinétique du premier ordre en vue de caractériser la mineralisation de quelques sols agricoles. *Agronomie*, 8; 289-294.
- Duran J. (2007) en IUSS Grupo de Trabajo WRB. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera Actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Glaser, B.; Lehmann, J.; Fuhrbister, M.; Solona, D.; Zech, W. (2001). Carbon and nitrogen mineralization in cultivated and natural savanna soils of Northern Tanzania. *Biol. Fertil. Soils*, 33; 301-309.
- Guillén, C. (2013) Efectos de la aplicación de cenizas de caldera de biomasa en el modelo jerárquico de agregación de un suelo forestal bajo condiciones oceánicas. Proyecto final de carrera. Licenciatura de Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona.



Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo

https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl_2072_210370/PFC_CarlaGuillenEscriba.pdf
(consultada 9 de julio de 2014)

- IBI (International Biochar Initiative) (2013). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar, Soil-Version 1.1 <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard> (consultado 8 de julio 2014)
- Isermeyer, H.(1952). Eine einfache method zur bestimmung der bodenatmung und der carbonate im boden. Zeitschrift für Pflanzener nahrung und Bodenkunde 56, 26-38.
- Kartlun, E., Saarsalmi, A., Ingerslez, M., Mandre, M., Andersson, S., Gaitnieks, T., Ozolincius, R., Varnagiryte-Kabasinskiene. (2008) Wood ash recycling – possibilites and risks. Springer, Heidelberg.
- Lehmann J. (2009). "Terra Preta de Indio", Encyclopedia of Soil Science.
- Mayor, J. (2010). "Biochar for soil quality improvement, climate change mitigations and more". Ph.D.
- Murphy, J.; Riley, J.P. (1962). *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters*. Anal. Chim. Acta 27, 31 - 36.
- Murwira, H.K., Kirchmann, H., Swift, M.J., (1990). The effect of moisture on the decomposition rate of cattle manure. Plant and Soil 122, 197-199
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. y Dean, L. A.; Estimation of available phosphorus in soils by the extraction with sodium bicarbonate; Circ. 939; U.S. Dep. of Agric.; 1954.
- Omil B., Piñeiro V., Merino A. 2007. Trace elements in soils and plants in temperate forest plantations subjected to single and multiple applications of mixed wood ash. Science of the Total Environment 381, 157–168.
- Özc, imen D_. Karaosmanog̃lu F. 2003 Production and characterization of bio-oil and Biochar from rapeseed cake. Department of Chemical Engineering, Istanbul Technical University, 80626 Maslak, Istanbul, Turkey pag.2
- Rutigliano F.A., Romano M., Marzaioli R., Baglivo I., Baronti S., Miglietta F., Castaldi S. (2013) Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop. European Journal of Soil Biology 60, 9-15.
- Sardar Khan, Brian J. Reid, Gang Li, Yong-Guan Zhu (2014). Application of biochar to soil reduces cancer risk via rice consumption: A case study in Miaoqian village, Longyan,China
- Steenari BM., Lindqvist, O. (1997) Stabilisation of biofuel ashes for recycling to forest soil. Biomass and Bioenergy
- Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Blum, W. E. H., and Zech, W., 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171(6): 893-899.
- Upadhyay K. P., George D., Swift R.S., Galea V. (2014) The Influence of Biochar on Growth of Lettuce and Potato. Journal of Integrative Agriculture, Volume 13, Issue 3, Pages 541-546
- Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., and Diafas, I. (2009). Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes



Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo

and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 149pp.

Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrot F.A., Lehmann J., José S. (2010) Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1: 56.