



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**BIOCARBONES (BIOCHARS),
CARACTERIZACIÓN Y EFECTO EN
LA BIOMASA Y NUTRICIÓN DE N P K
EN UNA GRAMÍNEA**

MARÍA ARIADNA ESCALANTE REBOLLEDO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA E N C I E N C I A S

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

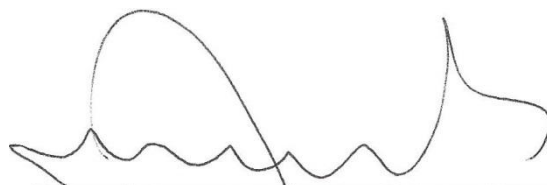
2013

La presente tesis, titulada: "Biocarbones (Biochars), caracterización y efecto en la biomasa y nutrición de N P K en una gramínea", realizada por la alumna: Marfa Ariadna Escalante Rebolledo bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN
CIENCIAS EDAFOLOGIA

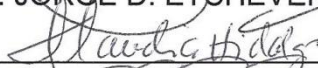
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



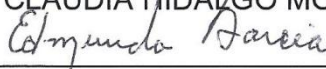
DR. JORGE D. ETCHEVERS BARRA

ASESOR:



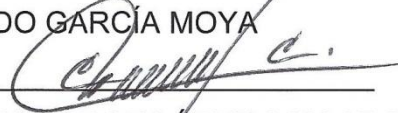
DRA. CLAUDIA HIDALGO MORENO

ASESOR:



DR. EDMUNDO GARCÍA MOYA

ASESOR:



DR. CATALINO JORGE LOPEZ COLLADO

ASESOR:



DR. JULIO CAMPO ALVES

Montecillo, Texcoco, Mexico, diciembre de
2013

BIOCARBONES (BIOCHARS), CARACTERIZACIÓN Y EFECTO EN LA BIOMASA Y NUTRICIÓN DE N P K EN UNA GRAMÍNEA

María Ariadna Escalante Rebolledo, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2013

RESUMEN

Uno de los desafíos actuales para la ciencia y la tecnología es crear o innovar conocimientos existentes que permitan resolver las necesidades que tiene la población del país. Para ello es necesario conocer tales necesidades y poder estudiar las estrategias y tecnologías pertinentes que lleven a la solución de dicha situación.

La demanda alimenticia actual en México es cada día mayor y ésta contrasta con el estado de abandono del campo. En particular nos preocupa el grado de deterioro que presenta el recurso suelo, así como la escasez de prácticas agronómicas que eleven la productividad de los cultivos. Esto nos lleva a probar tecnologías que en otras partes del mundo, aunque sea a nivel de investigación, han resultado en un beneficio para el campo.

El biocarbón (biochar) es un producto generado por la pirólisis de residuos orgánicos, primordialmente rastrojos y podas de árboles, que ha demostrado mejorar las características del suelo y aumentar la productividad de los cultivos, además de presentar el beneficio adicional que al ser aplicado al suelo ayuda al secuestro de carbono. Sin embargo, las condiciones de proceso y el tipo y calidad de la materia prima han generado biocarbones de distinta calidad, tanto para el aumento en la productividad de los cultivos como en la salud ambiental que incluye la del ser humano.

Es por esto que en esta investigación se planteó estudiar en México, ciertos aspectos de los biocarbones que nos permitan tener fundamentos acerca de la tecnología de producción y la calidad de los productos que con ella se generan.

Este estudio planteó como objetivo elaborar biocarbones a nivel artesanal, establecer su caracterización física, biológica y química, además de probarlo en un cultivo indicador para determinar su efecto en su productividad, en condiciones controladas.

Se elaboraron cuatro biocarbones generados de rastrojo de maíz procesados con diferentes tamaños de partículas y pirolizados artesanalmente a dos temperaturas. Las características físicas y químicas de los biocarbones así producidos fueron diferentes. Los materiales generados no provocaron fitotoxicidad y cuando aplicados a un cultivo de *Lolium perenne* L. (cultivo indicador), en diferentes dosis (0 a 20 toneladas equivalentes por hectárea), no mostraron un efecto significativo. Es probable que el corto tiempo del experimento y las condiciones experimentales hayan influido en esta respuesta. Los biocarbones tampoco impactaron, en general, las concentraciones nutrimentales del nitrógeno, fósforo y potasio de la parte aérea del *L. perenne*. En contraste, se observó una diferencia significativa positiva, pero independiente del tratamiento con biocarbón, cuando esta planta indicadora se trató con una lombricomposta mezclada con el biocarbón y el suelo, en contraste con lo ocurrido con la mezcla del biocarbón con suelo solo tratado con fertilización química.

Los resultados mostraron que es posible elaborar biocarbones de calidad de manera artesanal, que no provocaron fitotoxicidad en las plantas indicadoras, pero que aplicados al suelo mezclado con fertilizantes inorgánicos o con lombricomposta, no tuvieron una respuesta significativa importante, aunque no se descarta que fuese posible que la respuesta pudiese observarse en un tiempo más prolongado. La lombricomposta *per se* tuvo mayor influencia en el peso de biomasa, así como en el contenido de nitrógeno, mientras que la fertilización inorgánica aumentó ligeramente la concentración de fósforo. La respuesta al potasio en condiciones de invernadero fue mínima y no se espera que ésta ocurra en condiciones de campo.

Se considera que es necesario realizar estudios más profundos sobre las características de los biocarbones y su efecto en la nutrición de los cultivos, principalmente considerando mayores tiempos de interacción del biocarbón con el suelo, pruebas a nivel de campo antes de transferir esta tecnología de manera segura a los productores.

Palabras clave: *Biochar, pirólisis, caracterización, secuestro de carbono, bioenergía, biomasa.*

SUMMARY

One of the current challenges for science and technology is to create or innovate existing knowledge to meet the needs that have the population of our country. For this, it is necessary to know and understand those needs and study relevant strategies and technologies that lead to the solution of this situation.

Current food demand in Mexico is widening every day and it contrasts with the state of abandonment of the field. In particular, we are concerned with the degree of deterioration that presents the soil resource and the shortage of agronomic practices that increase crops productivity. This leads us to test technologies which in other parts of the world, even at research level, have resulted in a profit for the field.

The biochar is a product generated by the pyrolysis of organic waste, primarily stubble and tree pruning, which has been shown to improve soil properties and increase crop productivity, besides presenting the additional benefit that when applied to the soil helps carbon sequestration. However, the process conditions and the type and quality of the raw material have generated biochar of different quality, both for increased crop productivity and environmental health, including human beings.

Therefore, this research was designed to study in Mexico, certain aspects of biochar that allow us to have the bases of production technology and the quality of the products generated by this.

This study proposed as objective to develop biochar at an artisanal level, to establish their physical, biological and chemical characterization, in addition to test it in a crop indicator to determine its effect on productivity under controlled conditions.

Four different biochar were generated from corn stover, processed with different particle sizes and pyrolysed at two distinct temperatures.

The physical and chemical properties of the four biochar were different. The generated materials did not cause phytotoxicity and when applied to a crop of *Lolium perenne* (Indicator crop) in different doses (0 – 20 tons equivalents per hectare) showed no significant effect. It is probable that the short time of the experiment and the experimental conditions could have influenced this response. The biochar neither had an impact in the nutrient concentrations of nitrogen, phosphorus and potassium in the aerial part of the *L. perenne*. In contrast, a positive significant difference, but independent of the treatment with biochar, was observed when the test plant was treated with vermicompost mixed with biochar and soil, as opposed to what happened with the mixture of biochar and soil only treated with chemistry fertilization.

The results showed that it is possible to produce quality biochar by the artisanal way, which did not cause phytotoxicity in the indicator plants. However, when applied to soil mixed with inorganic fertilizers or vermicompost, there was no significant response, although it is possible that this could be observed over a longer time. The vermicompost per se had greater influence on the weight of biomass as well as on the content of nitrogen, while the inorganic fertilization slightly increased the concentration of phosphorus. The response to potassium in greenhouse conditions was minimal and it is not expected to occur under field conditions.

It is considered necessary to perform further studies on the characteristics of biochar and its effect on crop nutrition, especially considering longer interaction times of biochar with soil and field-level testing before transferring this technology safely to producers.

Index words: Biochar, pyrolysis, soil carbon sequestration, biofuels, biomass.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados por haberme dado esta oportunidad, pero sobre todo a aquellos que me ayudaron en mi trabajo con el único fin de cumplir con el suyo.

A CONACyT por haberme brindado el apoyo necesario para realizar el postgrado.

A la M.C. Alfonsina Judith Hernández del Laboratorio de Fitopatología por su valiosa ayuda, al MC. Adrián Hernández Livera del Laboratorio de Semillas y a la T.L. María Barbara Zamora Hernández por su apoyo y facilitación para realizar parte del trabajo, a la Dra. Libia Trejo, Jefa del Laboratorio de Nutrición quien realizó cuantificaciones en ICP, al MC. Francisco Landeros Sánchez del Laboratorio de Física de Suelos quien realizó las pruebas de física de los materiales y sustratos, a la MC. Greta Hanako Rosas del Laboratorio de Microscopía Electrónica, quien me brindó su apoyo en la realización de los estudios de SEM de los biocarbones y a la MC. Juliana Padilla del Laboratorio de Fertilidad de Suelos de este Campus por las facilidades brindadas en la realización de cada etapa de mi trabajo. A todos ellos, mi agradecimiento sincero.

A mi Director de tesis Dr. Jorge Etchevers Barra por sus enseñanzas y paciencia, así como a todos mis asesores por su esfuerzo para que saliera adelante, Dr. Edmundo García Moya, por su gran apoyo, Dra. Claudia Hidalgo, Dr. Catalino Jorge López Collado y Dr. Julio Campo Alves.

A la Universidad Veracruzana que impulsa y apoya a sus docentes a obtener un mayor grado académico en beneficio personal y de la Institución, en particular al Dr. Domingo Canales. A todos aquellos que semestre tras semestre procuraron las descargas para que yo hiciera el postgrado, en particular al Lic. Enrique Martínez, gracias por tu amistad.

A Manuel Martínez Escalante y Stefanie Tovar Carvajal, por toda la ayuda brindada para realizar los experimentos y “todo lo demás”, pues sin su apoyo hubiera sido muy difícil concluir todo esto.

DEDICATORIA

Al Ing. Celerino Escalante Enríquez, un hombre sabio en su profesión y en la vida cotidiana quien con su amor y firmeza me dirigió en el camino para siempre avanzar de manera honesta y con la frente en alto. Sé que si estuviera presente gozaría este momento conmigo.

A mi hijo Manuel, de quien espero ser ejemplo en su vida para luchar por sus sueños y a quien amo profundamente.

A Lelia, mi gemela, con quien he compartido estos momentos y muchos otros, durante toda mi vida y que siempre me ha dado su apoyo y amor fraternal, gracias.

A mi sobrino Manuel a quien amo en grande manera y a mi cuñado Manuel, a ambos por su amor, apoyo y amistad.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO UNO	4
BIOCARBÓN, MEJORADOR DE SUELOS, UNA POSIBILIDAD PARA EL CAMPO	5
1.1 INTRODUCCIÓN	5
1.2 ANTECEDENTES	9
Origen.....	9
Procesos de obtención del biocarbón.....	10
Variables que afectan la pirólisis de la biomasa.....	13
Características del biocarbón (Biochar).....	15
Efectos del biocarbón sobre las propiedades, procesos y funciones del suelo.....	20
Métodos de aplicación al suelo.....	24
Investigaciones realizadas con biocarbón a nivel de invernadero y campo.....	24
Secuestro de Carbono y Cambio Climático.....	25
Riesgos para la salud.....	28
Manejo, transporte y almacenamiento.....	29
Factibilidad económica, tecnológica y social en México para producir biocarbón.....	29
1.3 CONCLUSIONES	30
1.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
CAPÍTULO DOS	40
CARACTERIZACIÓN DE BIOCARBONES DE MAÍZ	41
2.1 INTRODUCCIÓN	42
2.2 REVISIÓN DE LITERATURA	44
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS	50
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
2.5 CONCLUSIONES	64
2.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

CAPÍTULO TRES	70
TOXICIDAD DE BIOCARBONES	70
3.1 INTRODUCCIÓN	71
3.2 REVISIÓN DE LITERATURA	74
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS	77
Descripción del sitio de estudio.....	77
Suelo y biocarbones.....	77
Prueba de evasión de lombrices <i>Eisenia fetida</i>	77
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
Prueba de evasión de lombriz de tierra (<i>Eisenia fetida</i>).....	79
Prueba de germinación de semillas.....	80
3.5 CONCLUSIONES	82
3.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
CAPITULO CUATRO	85
APLICACIÓN DE BIOCARBONES DE MAÍZ A UNA GRAMÍNEA	86
4.1 INTRODUCCIÓN	86
4.2 REVISIÓN DE LITERATURA	88
4.3 MATERIALES Y MÉTODOS	92
4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	97
Biomasa	97
Biocarbón < 4 mm de partícula de biomasa original, T 300°C (Experimento 1).....	97
Biocarbón > 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 2).....	100
Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original y T 650°C (Experimento 3).....	101
Porcentaje de nitrógeno	103
Biocarbón < 4 mm de partícula de biomasa original, T 300°C (Experimento 1).....	105
Biocarbón > 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 2).....	106
Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 3).....	107

Fósforo	109
Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, T 300°C (Experimento 1).....	109
Biocarbón > 4 mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 2).....	111
Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 3).....	113
 Potasio	 115
Biocarbón <4mm de partícula de biomasa original, T 300°C (Experimento 1).....	115
Biocarbón > 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 2).....	118
Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 3).....	118
Raíces	120
4.5 CONCLUSIONES	121
4.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
 ANEXO 1. BIOMASA Y VALORES DE NITRÓGENO FÓSFORO Y POTÁSIO DE <i>Lolium perenne</i> CON TRES BIOCARBONES, CUATRO CORTES	 124

ÍNDICE DE CUADROS

		Pág.
Cuadro 2.1.	Metodologías de la Iniciativa Internacional de Biochar empleadas para la caracterización de muestras de biocarbones de rastrojo de maíz (IBI, 2012).	51
Cuadro 2.2.	Características químicas de los biocarbones.	53
Cuadro 2.3.	Contenido de carbono, nitrógeno, fósforo y potasio de los biocarbones.	53
Cuadro 2.4.	Características físicas de los biocarbones.	54
Cuadro 2.5.	Porcentajes de humedad retenida a diferentes tensiones.	60
Cuadro 3.1.	Características de los biocarbones derivados de rastrojos de maíz.	78
Cuadro 3.2.	Prueba t de Student para lombrices en las diferentes dosis de biocarbón.	80
Cuadro 3.3.	ANOVA de germinación de lechuga cv. Climax, de los tratamientos de biocarbón de 0, 5, 10, 15 y 20 ton ha ⁻¹ .	81
Cuadro 3.4.	Medias y desviaciones estándares de los tratamientos de germinación de lechuga cv. Climax.	82
Cuadro 4.1.	Características de proceso de obtención, propiedades químicas y físicas de los biocarbones de maíz ensayados.	93
Cuadro 4.2.	Características físicas y químicas del suelo empleado en los tres biocarbones.	94
Cuadro 4.3.	Características de retención de humedad de la mezcla sustrato más lombricomposta.	94
Cuadro 4.4.	Características físicas y químicas de la lombricomposta empleada en los tres biocarbones.	95
Cuadro 4.5.	Medias de biomasa de los tres biocarbones.	98
Cuadro 4.6.	Medias y desviaciones estándares de nitrógeno, tres biocarbones.	104
Cuadro 4.7.	Medias, desviaciones estándares y significancia de fósforo de los tres experimentos.	110

Cuadro 4.8. Medias de la concentración de potasio en los tres biocarbones. 116

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Porcentaje de partículas en diferentes intervalos de tamaño de los cuatro biocarbones de maíz (IBI, 2013).	55
Figura 2.2	Vistas microscópicas con SEM de los biocarbones. a) Carbón activado, b) y c), biocarbón < 4mm y T de 300°C, d) y e) biocarbón de BM < 4mm y T de 650°C, f) y g) biocarbón > 4mm y T de 300°C, h) e i) biocarbón > 4mm y T de 650°C. Se observan partes con mucha porosidad y otras sin ella, a excepción del carbón activado que no se observó porosidad. En la foto d) aparecen estomas y en la i) fitolitos de silicio.	62
Figura 2.3	A la izquierda se observan esporas y a la derecha estructuras del material original.	63
Figura 2.4	Análisis elemental por microscopía electrónica de barrido, donde se observa contenidos de C, K y Al.	64
Figura 3.1	Germinación de semillas con suelo y biocarbones.	81
Figura 4.1	Biomasa acumulada de los cuatro cortes biocarbón < 4 mm y T 300°C.	99
Figura 4.2	Biomasa aérea seca de cuatro cortes con biocarbón <4 mm y T 300°C.	99
Figura 4.3	Dinámica de la biomasa aérea por cortes con biocarbón <4 mm y T 300°C.	100
Figura 4.4	Biomasa acumulada de los 4 cortes biocarbón > 4 mm y T 650°C.	101
Figura 4.5	Biomasa aérea seca de cuatro cortes, biocarbón > 4 mm y T 650°C.	101
Figura 4.6	Acumulado de biomasa cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 650°C.	102
Figura 4.7	Biomasa de cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T, 650°C.	103
Figura 4.8	Medias de concentración de nitrógeno, cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C.	105
Figura 4.9	Dinámica del nitrógeno por cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C	106

Figura 4.10	Nitrógeno de cuatro cortes, biocarbón > 4 mm y T 650°C.	107
Figura 4.11	Nitrógeno de cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 650°C.	108
Figura 4.12	Fósforo de cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C.	111
Figura 4.13	Dinámica de fósforo por cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C.	111
Figura 4.14	Fósforo de cuatro cortes biocarbón > 4 mm y T 650°C.	112
Figura 4.15	Fósforo de cuatro cortes biocarbón < 4 mm y T 650° C.	114
Figura 4.16	Potasio de cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C.	117
Figura 4.17	Dinámica de potasio por cortes, biocarbón < 4 mm y T 300° C	117
Figura 4.18	Potasio cuatro cortes, biocarbón > 4 mm y T 650°C.	118
Figura 4.19	Potasio biocarbón < 4 mm y T 650°C, cuatro cortes.	119
Figura 4.20	Crecimiento de raíces de <i>Lolium perenne</i> con biocarbón < 4 mm y T 300° C.	120
Figura 4.21	Crecimiento de raíces de <i>Lolium perenne</i> con biocarbón > 4 mm y T 650° C.	120
Figura 4.22	Crecimiento de raíces de <i>Lolium perenne</i> con biocarbón < 4 mm y T 650° C.	121

INTRODUCCIÓN GENERAL

La demanda alimentaria del mundo y en particular de nuestro país, sugiere estudiar nuevas tecnologías de producción que permitan satisfacer dicha demanda. Las condiciones de pérdida de fertilidad, erosión, degradación, desertificación, acidificación, contaminación de las tierras agrícolas de México, base primordial de la producción agrícola nacional, hacen urgente la ejecución de acciones que permitan rescatar el suelo de su actual condición de deterioro. Sin una acción concertada de políticas públicas apropiadas, del empleo de la ciencia y la tecnología disponible, no será posible producir los alimentos que la nación requiere para sacar de la pobreza a 50 millones y aproximadamente de la pobreza alimentaria 12 millones, que oficialmente se contabilizan en este 2013.

Alternativas hay muchas, pero aquí nos focalizaremos en una en particular, por lo novedoso y las buenas experiencias consignadas en la literatura; el biocarbon, resultante de la pirólisis de biomasa de diferente origen, que al ser aplicado al suelo provoca mejoría en sus propiedades fisicoquímicas y biológicas y que se ha mencionado que originaría un aumento en la productividad de los cultivos. Simultáneamente se considera que el suelo tratado con biocarbón actuaría como un reservorio altamente recalcitrante. Con ello se evitaría que el carbono de la biomasa retorne rápidamente a la atmósfera como CO_2 , lo que impactaría positivamente en el cambio climático. Beneficios adicionales de la producción del biocarbón son: que su generación provenga de una energía renovable y la reducción de residuos orgánicos que generalmente constituyen focos de contaminación ambiental. Por ser el biocarbón una alternativa tecnológica reciente, es preciso conocer más acerca de los aspectos que hacen que este producto tenga los resultados benéficos señalados. Poco se sabe, por ejemplo, sobre el efecto que tiene el tipo de materia prima usada en su manufactura y los diversos procesos de obtención. Un aspecto básico es la caracterización de sus propiedades, la selección de los mejores procedimientos metodológicos para el propósito anterior, los efectos que tiene su aplicación al suelo en las propiedades de éste y en los cultivos que en él se desarrollan.

Ensayar estos materiales en suelos de México generaría las bases para proponer su uso como una práctica para mejorarlos y aumentar la productividad de los

cultivos, aun cuando estamos conscientes que es necesaria investigación, en particular, por la amplia gama de agroecosistemas existentes en el país y por la necesidad de identificar las posibles fuentes de materia prima que pueden ser empleadas en su elaboración. El desarrollo de procesos nacionales factibles de ser implementados para elaborar biocarbón constituye un desafío adicional para los tecnólogos locales.

Palabras clave: *Biochar, pirólisis, caracterización, secuestro de carbono, bioenergía.*

GENERAL INTRODUCTION

The growing food demand in the world and specifically in our country suggests the study of new strategies to satisfy it. The conditions of fertility loss, erosion, degradation, desertification, acidification and pollution of the agricultural land in Mexico, the primary basis of national agricultural production, makes urgent the implementation of actions to rescue the soil resource from its current state of deterioration. Without a concerted action of appropriate public policies, the use of science and available technology, it will not be possible to produce the food that the nation requires to get out of poverty to about 50 million people and about 12 million of food poverty, which are officially recorded in 2013.

There are many alternatives, but here we will focus on one in particular, because of the newfangled and the good experiences reported in the literature: the biochar. This is a product of pyrolysis of biomass of different sources, which when applied to the soil causes improvement in its physical, chemical, physicochemical and biological properties, which has been reported to lead to an increase in crops productivity. Simultaneously it is considered that biochar-treated soil act as a highly recalcitrant carbon sink. This would prevent the biomass carbon to quickly return to the atmosphere as CO₂, positively impacting climate change. Additional benefits of biochar production are that its generation comes from renewable energy sources and the reduction of organic waste that usually are sources of environmental pollution. Because biochar is a recent technological alternative, is necessary to know more about the aspects that make this product to have the reported beneficial results. Little is known, for example, on the effect of the type of raw material used in its manufacture and the various obtaining processes. A key aspect is the characterization of its properties, the selection of the best methodological procedures for the above purpose and the effects that its application to soil has on the properties of it and the crops that grow in it.

Testing these materials in soils of Mexico would generate the bases to propose its use as a practice to improve them and increase the productivity of crops, even though we are aware that it requires a lot more research, in particular because of the wide range of existing agroecosystems in the country and the need to identify potential sources of raw materials that can be used in their manufacture. The

development of national processes, feasible to be implemented, to produce biochar presents an additional challenge for local technologists.

Index words: Biochar, pyrolysis, soil carbon sequestration, biofuels

CAPÍTULO UNO

BIOCARBÓN, MEJORADOR DE SUELOS, UNA POSIBILIDAD PARA EL CAMPO

CAPÍTULO UNO

BIOCARBÓN, MEJORADOR DE SUELOS, UNA POSIBILIDAD PARA EL CAMPO

1.1 INTRODUCCIÓN

El efecto del biocarbón en el suelo se ha investigado en muchas partes del mundo. (Lehman and Joseph, 2009; Major, 2010; Steiner, 2010; van Zwieten *et al.*, 2010a); sin embargo, en nuestro país recién se inicia su estudio y se tiene poca información respecto a sus beneficios para los suelos y cultivos locales. De ser positivos los resultados de los estudios que se realicen con este producto, se podría proponer su uso, dadas las ventajas descritas en la literatura (Downie, 2007; Lehmann and Joseph, 2009; Amonette, 2009) y al hecho que su elaboración se hace con materiales derivados de recursos renovables, *in situ* en parcelas de pequeños productores y aplicarse directamente al suelo para mejorarlo.

El biocarbón es un producto cuya obtención puede generarse en donde exista biomasa disponible. En México aún hay lugares con suficiente biomasa como subproducto de las actividades agrícolas forestales por lo que sería posible producirlo y aplicarlo como mejorador del suelo. Sin embargo, es necesario realizar el análisis de sus características y propiedades, y los estudios de los efectos de su aplicación a los suelos. Se sabe que el biocarbón provoca cambios positivos en el suelo que favorecen sus propiedades y el crecimiento de los cultivos (Ippolito *et al.*, 2011).

Si se logra mejorar el suelo y aumentar la producción de alimentos podría ser un beneficio importante para contribuir a la alimentación de muchos mexicanos, ya que la pobreza en México según INEGI (2013), abarca alrededor de 52 millones de personas (46.2% de la población) y de ella, la pobreza extrema, que incluye la alimentaria, a 11.7 millones de personas (22.5%). El derecho a la alimentación está consagrado en la Constitución de México, pero la pobreza alimentaria

significa que una proporción de la población no tiene acceso a los alimentos esenciales, lo cual es grave y doloroso y contraviene el espíritu de nuestra Carta Magna.

El deterioro ambiental que presenta México, en el que destacan: la escasez, la mala calidad del agua, la mala calidad del aire en los lugares conurbados con agricultura periurbana y en particular la disminución de la fertilidad del suelo. Esta última se presenta por una seria condición de erosión, degradación, contaminación, pérdida de la materia orgánica.(Semarnat-Colpos, 2003) esto incide de manera directa en la producción alimentaria. Como consecuencia de lo anterior la nutrición de los cultivos se ve afectada, ocasionando deficiencias nutrimentales graves o en algunos casos excesos por hiperfertilización, lo que afecta negativamente la calidad de los alimentos y la salud ambiental. Existe preocupación por el uso indiscriminado de fertilizantes, ya que por lo general las dosis empleadas no consideran las necesidades reales de los cultivos y ocasionalmente se considera el aporte natural que puede hacer el suelo. Si la oferta nutrimental no satisface la demanda impuesta por un cultivo no se pueden alcanzar los rendimientos máximos probables que permiten las peculiaridades de cada agroecosistema y, como efecto colateral, se genera una degradación del suelo. Debe destacarse que una de las degradaciones que mayormente preocupan, es la pérdida de la materia orgánica y el hecho de que pocos agricultores usen abonos orgánicos (Fortis *et al.*, 2007). Existe información que hace pensar en un potencial futuro de las nuevas tecnologías que emplean biofertilizantes, microorganismos, minerales como la zeolita pudieran mejorar esta condición (Yamoah *et al.*, 2002), que podría verse apoyado por el empleo del biocarbón.

Ante esta preocupante situación de deterioro del suelo, se hace imperioso implementar estrategias para mejorar su calidad. Adicionalmente, el fenómeno del cambio climático tiende a agravar la situación, por su efecto en la disponibilidad de agua (deficiencia o exceso), sequía extrema o las lluvias torrenciales, muy altas o muy bajas temperaturas que afectan la producción de alimentos y la conservación de la calidad del suelo. Por ello, el llamado es a hacer una gestión de los suelos, que asegure tanto su conservación como la producción. Ello exige el empleo de variedades adaptadas a las nuevas condiciones del entorno que se

están creando, que integradas a las prácticas de conservación, recuperación del suelo, su fertilización inorgánica racional y el uso de abonos orgánicos y biofertilizantes, la gestión sustentable de los cultivos, entre otros aspectos, contribuirían a iniciar la recuperación de la fertilidad perdida de los suelos (Funes-Monzote *et al.*, 2001; Sánchez *et al.*, 2011).

La aplicación del biocarbón (biochar) es una tecnología que debe someterse a prueba antes de ser recomendada. Según varios investigadores (Chan *et al.*, 2007; Lehmann and Joseph, 2009; Steiner, 2010) su empleo podría conducir a una mayor producción en el campo. En México recién se comienza a estudiar el uso del biocarbon y, aunque a nivel mundial desde hace algunos años (Lehmann and Joseph, 2009; Verheijen *et al.*, 2009), constituye una práctica común, como lo señalan los últimos autores mencionados.

El biocarbón (biochar) es el producto de la pirólisis de biomasa en un ambiente ausente o con muy baja concentración de oxígeno, lo que hace que sea diferente al carbón usado como combustible. Es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos con bajo o limitado suministro de oxígeno a temperaturas relativamente bajas, inferiores a los 700°C. La International Biochar Initiative (IBI) en su "Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil", define al biocarbón como "un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno" (International Biochar Initiative, 2012).

Según Amonette (2009), el biocarbón es un carbón con alto contenido de carbono orgánico, altamente resistente a la descomposición, por lo que funciona como un almacén de carbono recalcitrante al ser aplicado al suelo como mejorador. Este carbono es retenido y no se transforma en CO₂ fácilmente, por lo que se libera muy lentamente a la atmósfera y contribuye a disminuir la concentración de este gas en ella, siendo un factor inhibitor del cambio climático.

Las materias primas para la preparación del biocarbón son numerosas. Entre ellas podemos mencionar: residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles y desperdicios orgánicos de la vida urbana. Lehmann *et al.* (2009) mencionan entre dichas materias primas a la madera, estiércol, hojas, residuos de cultivos, entre otros. Brick (2010) agregó a éstas, camas de pollo, algas, cáscaras de naranja, de

nueces y lodos residuales. La disponibilidad de estos últimos se incrementará en el futuro cercano en la medida que se construyan un mayor número de plantas de tratamiento de aguas grises en el país. Su destino final será casi siempre el suelo, sin que se conozca mucho acerca de los contaminantes que pueda contener en su estado natural. Su transformación a biocarbon, al menos asegura, la exclusión de gérmenes que pudiesen resultar nocivos para los cultivos de consumo humano o animal.

Los científicos (Lehmann and Joseph, 2009; Downie *et al.*, 2009) aseguraron que al aplicar biocarbón al suelo, el carbono que contiene debe considerarse como carbono secuestrado. Este carbono, además, mejora las funciones de éste y contribuye a evitar efectos nocivos a corto y largo plazos del ecosistema mundial (Verheijen *et al.*, 2009). Amonette (2009) refiere un aumento de la capacidad de retención de nutrimentos en el suelo con la consecuente reducción de la necesidad de aplicar altas dosis de fertilizantes, lo cual trae consigo una reducción del impacto en las tierras cultivables y el clima.

Este trabajo tiene como objetivo compilar la información más relevante del biocarbón a nivel mundial para iniciar estudios en México, a nivel de laboratorio, invernadero y campo que permitan verificar su eficacia como mejorador de suelos y como medio para secuestrar carbono en los mismos.

1.2 ANTECEDENTES

Origen

Este producto tuvo su origen al ser redescubiertas las tierras negras de los indios amazónicos, conocidas como Terra Preta en Brasil por Smith en 1879 y Hartt en 1885 (Woods, 2004). Ellos consignaron la existencia de unos suelos oscuros y fértiles en la Amazonia brasileña, pero no pudieron precisar su origen. Se propusieron diversas teorías, pero actualmente se reconoce que estos son suelos son producto de las actividades del hombre al habitar el lugar, para mejorar los suelos. Falcao (2012) considera que dichos suelos fueron formados por los indios por deposición de materiales orgánicos, derivados de la quema y esqueletos de pescado, lo cual los transformaba en suelos fértiles que mantenían cierta riqueza nutrientes. Las altas concentraciones de carbón pirogénico en Terra Preta provinieron principalmente del carbón de cocina y restos de incendios y de asentamientos que no son combustibles (Glaser *et al.*, 2001). Un contenido anormalmente alto de nutrimentos esenciales como P, Ca y K encontrados en muchos de estos suelos apoyan tales pronunciamientos. Las teorías acerca del origen antropógeno de las tierras negras también incluyen quema de los sitios, ya sea por incendios en el área o los intencionales, realizados para derribar bosques con el fin de usarlos como tierras de cultivo y para eliminar la maleza (Woods and Glaser, 2004). Sin embargo, hoy es ampliamente aceptado que fueron no solamente usadas por los pobladores locales recientes, sino que también son un producto de la gestión indígena del suelo como lo propuso Gorou (1949). Estudios posteriores (Sombroek, 1966; Smith, 1980; Kern and Kampt, 1989) confirmaron estas propuestas.

Se considera que los inicios de la formación de Terra Preta de Indio (tierra negra) corresponden aproximadamente a los últimos tiempos del período pre-colombino en la Amazonia (Neves *et al.*, 2003). Orlando (2012) comentó que antes se pensaba que sólo se encontraban en la Amazonia, pero aseguró que recientemente este tipo de suelos se encontró en México y África. Asimismo fueron hallados en Borneo (Sheil *et al.*, 2012) y en Estados Unidos de América se tienen evidencias de su existencia desde hace más de 10 mil años, que habrían sido producidos por incendios en las praderas, tanto naturales como inducidos

(Skjemstad *et al.*, 2002; Laird *et al.*, 2009). En Australia y Alemania (Skjemstad *et al.*, 2002) y en Japón (Ishii and Kadoya, 1994) se han encontrado suelos con alto contenido de carbón.

El estudio de esos suelos con alto contenido de carbón llevó a concluir que presentaban excelentes propiedades, entre las que podemos mencionar su elevado contenido de materia orgánica y carbono residente, una elevada disponibilidad nutricional y altos contenidos de humedad, mayor capacidad de intercambio catiónico y mayor actividad microbiana (Lehman and Joseph, 2009).

En una revisión histórica del biocarbón Lehmann *et al.* (2009) señalaron que muchos investigadores como Retan (1915), Morley (1927), Tyron (1948), Kishimoto y Sugiura (1980, 1985), Santiago y Santiago (1989) han estudiado el uso de carbón en la gestión del suelo, entre otros y afirma que incluso Liebig (1878), describió una práctica en China en la cual la biomasa de desecho era mezclada con suelo e incendiada durante varios días hasta obtener una tierra negra, la cual proveía de vigor a las plantas. Pero no fue sino hasta 1966 que el científico holandés Wim Sombroek en su publicación "Suelos de la Amazonia" prestó atención a estos suelos y tiempo después promovió la idea de desarrollar nuevas tierras negras como almacenes de carbono para cultivos intensivos que él llamó Tierra Negra Nueva (Woods and McCann, 1999; Lehmann *et al.*, 2003). De aquí nació la idea de usar una tecnología semejante para que el carbón de la quema de desechos vegetales fuese enterrado en el suelo, como una forma de capturar de manera relativamente permanente (secuestrar) el exceso de carbono atmosférico y contribuir a paliar el efecto del cambio climático.

Por ello, en un intento de imitar o recrear este tipo de suelos con altos contenidos de carbón y tan buenas características y alta productividad, se originó el interés particular en el estudio del biocarbón.

Procesos de obtención del biocarbón

Los procesos para obtener biocarbón son diversos, principalmente se consideran las tecnologías termoquímicas para transformar la biomasa en fuentes de energía renovable. Éstas pueden ser clasificadas en cuatro categorías generales: pirólisis

lenta, pirólisis rápida, pirolisis ultrarápido y la gasificación (Laird *et al.*, 2009; Brick 2010; Ippolito *et al.*, 2011). La pirólisis ocurre en ausencia completa de oxígeno mientras que la gasificación se da con reducida cantidad de él. Brick (2010) propone un quinto proceso que es la carbonización hidrotérmica.

La pirólisis según Laird *et al.* (2009) sería el proceso termoquímico que puede ser usado para transformar biomasa de baja densidad energética ($\sim 1.5 \text{ GJ m}^{-3}$) y otros materiales orgánicos a líquidos de alta densidad energética conocidos como bio-aceites ($\sim 22 \text{ GJ m}^{-3}$ o $\sim 17 \text{ MJ kg}^{-1}$), a sólidos de alta densidad energética conocidos como biocarbón (biochar) ($\sim 18 \text{ GJ kg}^{-1}$) y a un gas de relativamente baja densidad energética, conocido como gas de síntesis (syngas) ($\sim 6 \text{ MJ kg}^{-1}$). Fundamentalmente la pirólisis involucra el calentamiento de materiales orgánicos a temperaturas superiores a 400°C en ausencia de oxígeno. A estas temperaturas, los materiales se descomponen térmicamente, liberando una fase de vapor y una fase sólida residual (biocarbón). Si los vapores de la pirólisis son enfriados ocurre una condensación en compuestos líquidos polares y de alto peso molecular (bio-aceite), mientras que los compuestos volátiles de bajo peso molecular permanecen en la fase gaseosa (gas de síntesis o syngas). Las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la pirólisis son muy complejas y dependen tanto de la naturaleza de la biomasa como de las condiciones del reactor. Cuando se usa una tecnología de alta eficiencia es posible alcanzar rendimientos de masa alrededor del 30-40% (base húmeda), con producciones de energía de cerca del 30% (contenida en el carbón) y contenidos de carbono fijado arriba del 90% de la biomasa original (McHenry, 2009). Las condiciones de pirólisis y las características de la materia prima determinan en gran medida las propiedades físicas y químicas del biocarbón producido (como composición, distribución de partícula y de tamaño de poro), lo que define la conveniencia de hacer su aplicación en un suelo, registrar su comportamiento, transporte y destino en el ambiente (Verheijen *et al.*, 2009).

Pirólisis lenta. La pirólisis convencional o lenta se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa pausados, temperaturas bajas y largos tiempos de residencia de sólidos y gas. De acuerdo al sistema, los lapsos de calentamientos son cerca de 0.1 a 2°C por segundo y prevalecen temperaturas alrededor de los 500°C . El tiempo de residencia del gas puede ser mayor de 5 s, mientras que el

de la biomasa puede ser un periodo de minutos a días (Sadaka and Eng, 2007). Según Gheorghe *et al.*, 2009 este sería el proceso con el más alto rendimiento de biocarbón.

Pirólisis ultrarrápida. La pirólisis ultrarrápida se caracteriza porque las temperaturas a las que se lleva a cabo el proceso son moderadas (400-600°C) y a amplitudes de calentamiento rápidos ($>2^{\circ}\text{C s}^{-1}$). Los tiempos de residencia del vapor son usualmente menores a 2 s. En este sistema se produce considerablemente menos alquitrán y gas. Sin embargo, los productos aceitosos obtienen su máximo rendimiento, entre el 75 y 80% (Sadaka and Eng, 2007; Demirbas, 2009).

Pirólisis rápida. La única diferencia entre la pirólisis ultrarrápida y la rápida (más exactamente definida como termólisis) es el periodo de calentamiento y por tanto los tiempos de residencia y productos derivados. El intervalo de calentamiento es entre 200 y 10^4 $^{\circ}\text{C s}^{-1}$ y las temperaturas que prevalecen son usualmente más altas de 550°C. Debido al corto tiempo de residencia del vapor, los productos son de alta calidad, principalmente líquidos, como gran cantidad de bioaceite y gases ricos en etileno que podrían ser usados para producir alcoholes o gasolina. La producción de carbón y alquitrán es mucho menor en este proceso (Farag *et al.*, 2002; Czernik and Bridgwater, 2004; Sadaka and Eng, 2007). Este tratamiento provoca la ruptura de los polímeros de los componentes de la biomasa en vapores condensables que forman bio-aceite. Además, podría ser potencialmente un método seguro de eliminación de materias primas contaminadas por toxinas que, por lo demás, son residuos (Mullen *et al.*, 2010).

Gasificación. Al inicio, la biomasa especialmente madera, se quema en una secuencia de dos reacciones. La primera es la conversión de madera a carbón y se le llama carbonización con gasificación de madera. Esto, básicamente, es la misma conversión que ocurre en la pirólisis lenta. Después que el carbón se ha formado, la segunda reacción, con mayor temperatura, hace que el carbón sea convertido a ceniza, llamada gasificación de carbón. Si hay demasiado oxígeno entonces todo el carbón es consumido y sólo quedan cenizas. Si la cantidad es limitada, entonces sólo una parte del carbón es consumido y algunos remanentes salen por el fondo del gasificador (McLaughlin *et al.*, 2009).

Carbonización hidrotérmica. Otra tecnología para producir biocarbón es la carbonización hidrotérmica, que consiste en aplicar calentamiento a materiales con gran contenido de agua, como lodos residuales, pulpa de café, estiércoles, algas, entre otros, sumergidos en agua y aunque la temperatura es alta, no deben llegar a la ebullición (Brick, 2010). Por este proceso ha sido posible carbonizar materiales sólidos con lignina y celulosa, y polisacáridos disueltos en agua, con la obtención de productos carbonosos nanoestructurados (Baccile *et al.*, 2010). Asimismo, se pueden producir biocarbones a temperaturas bajas (~200 °C) y tiempos muy cortos (Titirici *et al.*, 2007). Además como no es necesario secar los materiales para hacer el biocarbón, significa que hay un gran ahorro de energía y, por tanto, los costos de producción disminuyen. Sin embargo, no ha tenido gran desarrollo y sólo existen algunas plantas piloto.

Verheijen *et al.* (2009) consideran que al proceso más adecuado para producir biocarbón como mejorador de suelos y a fin de ayudar a mitigar el cambio climático, la pirólisis lenta es la más adecuada, ya que maximiza la producción de biocarbón que es el compuesto más estable de los productos finales de la pirólisis. Las temperaturas de 300 a 500°C optimizan el rendimiento de biocarbón (Hayes, 2009).

Variables que afectan la pirólisis de la biomasa

Diversas variables afectan el mecanismo y la cinética de las reacciones de pirólisis. Estas variables, incluyen la composición del sustrato, el intervalo de calentamiento, la temperatura y presión de la cama, atmósfera ambiental presente y uso de catalizadores, por lo que deben ser completamente comprendidas y apreciadas. Entre otras cosas, estas variables tienen un efecto profundo en la secuencia y cinética de las reacciones y, por tanto, en el rendimiento de los productos formados. Al entender la influencia de estas variables en el proceso, las condiciones de pirólisis pueden ser anticipadas y controladas para reducir las reacciones secundarias no deseadas y promover la formación de productos deseables, ya que las cantidades de fracciones sólida, líquida y gaseosa dependen marcadamente de tales variables, como son la distribución de productos dentro de cada fase producida (Mohan *et al.*, 2006; Sadaka and Eng, 2007). La pirólisis rápida produce cerca del 12% de biocarbón, la moderada el

20%, la lenta el 35%, la gasificación del 10% al 20% y la combustión hidrotérmica del 37 al 70% (Brick, 2010).

Composición del sustrato. La biomasa que se puede emplear para producir biocarbón está formada de materiales complejos y heterogéneos derivados de diferentes orígenes. Su estructura y composición varía de acuerdo a las especies de las cuales proviene y dichos componentes son responsables de la variedad y complejidad de los productos formados durante la pirólisis (Mohan *et al.*, 2006). Además, Krull *et al.* (2010), encontraron que la mayoría de las propiedades agronómicas variaron de acuerdo a la materia prima. La heterogeneidad de la biomasa resulta en un mayor obstáculo para su utilización química, debido al rendimiento más bajo de productos individuales derivados de cada uno de sus elementos. Esto también afecta el rendimiento del carbón y otros tipos de combustibles que son posibles productos de la pirólisis de biomasa (Sadaka and Eng, 2007). Además es necesario considerar que en la actualidad no sólo se usan los materiales que formaron la Terra Preta, que eran principalmente restos de árboles, malezas, huesos, sino también se utilizan restos de plantas cultivadas que han tenido un manejo agronómico donde se han hecho aplicaciones de agroquímicos, lodos residuales o camas avícolas que probablemente contienen concentraciones importantes de herbicidas, pesticidas, fungicidas, metales pesados y antibióticos, que pueden afectar el suelo, los cultivos y, finalmente, la salud humana (Verheijen *et al.*, 2009).

Intervalo de calentamiento. Este parámetro representa el aumento de temperatura por segundo, que aunado a la duración del calentamiento y a su intensidad, afectan la velocidad, grado, secuencia de las reacciones de pirólisis, y la composición de los productos resultantes. Las reacciones ocurren en una amplia gama de temperaturas; por lo tanto, los productos formados al principio tienden a experimentar una transformación adicional y su descomposición en una serie de reacciones consecutivas, de manera que al ser más bajo ese intervalo se aumenta la producción de biocarbón y al ser mayor, disminuye (Antal & Gronli, 2003; Sadaka and Eng, 2007). Este parámetro es importante porque modifica su posible valor para la agricultura, y no existe un consenso en cuál es la mejor materia prima en términos de uso de la tierra y producción de energía (Sohi *et al.*, 2010).

El nivel de calentamiento es función del tamaño de la materia prima y el tipo de equipo de pirólisis empleado. La velocidad de difusión térmica dentro de una partícula disminuye con el incremento de su tamaño, lo que resulta en un intervalo de calentamiento más bajo. Los productos líquidos son favorecidos por la pirólisis de partículas pequeñas en altos niveles de calentamiento y temperatura alta, mientras que el rendimiento de productos volátiles (gases y líquidos) se incrementa con el aumento del nivel de calentamiento y los residuos sólidos disminuyen (Sohi *et al.*, 2010). El carbón es maximizado por la pirólisis de partículas grandes con bajos rangos de calentamiento y baja temperatura (Sadaka and Eng, 2007).

Temperatura. El tiempo requerido para obtener un cierto nivel de conversión disminuye con el incremento de temperatura. A baja temperatura, el carbón es el producto dominante seguido por el agua. Las maderas duras producen menos carbón pero más ácidos que las maderas blandas (Sohi *et al.*, 2010).

Características del biocarbón (Biochar)

Algunos autores consideran que la composición química de los biocarbones es muy similar al carbón producido para combustible y que lo único que los distingue es el objetivo para el cual fueron preparados (Schahczenski, 2010). Sin embargo, el segundo contiene más oxígeno e hidrógeno debido a un proceso incompleto de pirólisis (Sohi *et al.*, 2010) y es muy diferente del carbón mineral, que también tiene su origen en la biomasa, pero fue formado por procesos geológicos en tiempos con escalas geológicas (Major, 2011).

Debido a que la materia prima para elaborar el biocarbón es muy heterogénea y las condiciones combinadas de las reacciones químicas que ocurren en el proceso, los biocarbones resultantes posean un conjunto único de características estructurales y químicas (Antal y Gronli, 2003; Brick, 2010).

Numerosos estudios (Lehmann and Joseph, 2009; Woolf *et al.*, 2010; Shrestha *et al.*, 2010; Major, 2010), sugieren que los componentes de carbono en el biocarbón (de madera) son altamente recalcitrantes en los suelos esto es, que resisten la oxidación química y biológica, por lo que su tiempo de residencia de cientos a miles de años es al menos de 10 a 10 mil veces más grande que los tiempos de

residencia de la mayoría de la materia orgánica del suelo. Por esta característica de recalcitrancia, la adición de este producto al suelo puede actuar como un sumidero potencial de carbono (Verheijen *et al.*, 2009) y así contribuir a la mitigación del exceso de CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, es importante mencionar que no todo el biocarbón permanece inalterable en el suelo, sino que una parte puede ser oxidada (Cheng *et al.*, 2008) y modifica algunas cualidades.

La celulosa es uno de los componentes importantes de los residuos agrícolas, por ello resulta interesante observar cuál es su cambio durante la pirólisis. Su degradación térmica entre 250 y 350°C da lugar a muchos compuestos volátiles (vapores de agua y alquitrán, hidrocarburos, ácidos, H₂, CH₄, CO y CO₂), quedando una matriz de carbono amorfa y rígida (Novak *et al.*, 2009). Al aumentar la temperatura, se incrementa la proporción relativa de carbono aromático por la pérdida de los compuestos volátiles y se lleva a cabo la conversión de carbonos de oxialquilos a arilos y oxiarilos de estructuras como el furano (Baldock & Smernik, 2002). A 330 °C las láminas de grafeno poliaromático empiezan a crecer lateralmente, a expensas de la fase de carbono amorfo y eventualmente coalescen. A 600 °C, el proceso dominante es la carbonización, lo que provoca la remoción de la mayoría de átomos no carbonosos como Ca, Mg, K, entre otros, que se mantienen de la materia original y por ello aumenta aún más la proporción relativa del contenido de carbono, la cual puede ser mayor del 90% en peso en los biocarbones de materias primas de madera (Antal y Gronli, 2003).

En resumen, es comúnmente aceptado que cada partícula de biocarbón consiste de dos fracciones estructurales principales: láminas juntas de grafeno cristalino y estructuras aromáticas amorfas ordenadas, que están caracterizadas por enlaces de carbonos en forma de anillos de tipo benceno con oxígeno o hidrógeno (Lehmann y Joseph, 2009). Estos enlaces entre estructuras aromáticas de C-O y C-H gobiernan la estabilidad del biocarbón y son usados para medir el grado de aromaticidad en los compuestos (Hammes *et al.*, 2008). También tienen estructuras de carbono oxidadas y alifáticas muy fácilmente degradables, además esta estructura química y los componentes orgánicos que conforman la biomasa original directamente influyen las propiedades químicas y físicas del biocarbón formado, las cuales a su vez definen los efectos benéficos del biocarbón y su tiempo de residencia en el suelo (Schmidt y Noack, 2000; Lehmann, 2007).

Los biocarbones son sustancias químicas con bajo valor nutricional para los vegetales y con baja reactividad por su naturaleza aromática muy condensada (Glaser, 2001). El esquema de caracterización general divide al biocarbón en un pequeño número de constituyentes, que son: humedad, ceniza (compuestos como sílice, hierro, alúmina y materia no combustible), materia volátil o móvil y materia residente o recalcitrante (carbono fijado, se refiere al sólido combustible que queda después que la materia volátil ha sido expulsada, pero no es carbono en su totalidad) (McLaughlin *et al.*, 2009).

Un concepto importante es la materia volátil o móvil, que es la fase gaseosa que se produce cuando el biocarbón es calentado. Ésta es una parte transcendental en lo que se refiere al efecto del biocarbón al aplicarlo al suelo, ya que existe evidencia que precipita dentro del mismo y además provee una fuente de carbono soluble que puede causar una deficiencia de nutrientes a corto plazo, porque estimula el crecimiento de microorganismos que compiten con la planta por nitrógeno disponible y, además, desaparece generalmente en una estación de crecimiento, sin contribuir a mejorar las propiedades del suelo a largo plazo (McLaughlin *et al.*, 2009).

Otro aspecto importante con respecto a su composición es su contenido tan elevado de carbono, que al entrar en el suelo, elevaría la relación C:N. Novak *et al.* (2010), determinaron para esta relación un valor de 245 en un biocarbón de cáscara de nuez y concluyeron que el 58% de carbono se encontraba como estructuras aromáticas altamente condensadas, menor cantidad en forma alifática (29%) y carboxílica (13%). En un análisis de un biocarbón producido a partir de roble blanco y rojo, se dedujo su composición química de 90.8% de carbono, 7.2% de oxígeno y 1.7% de hidrógeno (Cheng *et al.* 2008). Mientras que en un biocarbón de arroz y otro de trigo se encontraron 80.7% y 80.4% de carbono, 9.11% y 9.03% de oxígeno y 2.79% y 2.75% de hidrógeno, respectivamente, por lo que se observa su gran variabilidad (Qiu *et al.* 2008). Debido a que los materiales ricos en nitrógeno generalmente tienen una baja relación C:N y un elevado contenido de humedad, son buenos para producir composta, lo que provoca la liberación de nitrógeno para las plantas y microorganismos; sin embargo, cuando esa relación es alta, como en los materiales leñosos, la liberación es disminuida o nulificada. Debido a su recalcitrancia, el uso del

biocarbón como mejorador de suelos no conlleva un aumento de carbono lábil, por lo tanto, la relación C:N efectiva no aumenta, por lo que no se tiene un efecto adverso en la asimilación de nitrógeno por las plantas (Kimetu *et al.*, 2008). En estudios recientes en los cuales se han adicionado abonos ricos en nitrógeno al biocarbón, se observó una reducción de la pérdida de este último elemento por volatilización de amoníaco arriba del 50% (Steiner *et al.*, 2010).

Los estudios de caracterización de biocarbones han consignado el pH de ácido a básico, con una media de 8.1 y un intervalo entre 6.2 a 13 (Chang and Xu, 2009; Srinivasarao *et al.*, 2013). En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es muy variable debido a su química superficial y va desde unas cuantas unidades hasta 40 cmol kg^{-1} y cambia después de su incorporación a los suelos por sus interacciones con el ambiente y se ha demostrado ser muy baja en temperaturas bajas de pirólisis e incrementarse en significativamente temperaturas más altas (Lehmann, 2007). También presenta mayor capacidad de adsorber cationes que otros tipos de materia orgánica del suelo por unidad de carbono (Sombroek *et al.*, 1993), debido a su mayor área superficial, mayor carga negativa superficial y mayor densidad de carga (CIC potencial por unidad de área). Además la oxidación del biocarbón forma grupos carboxílicos sobre los puentes de los núcleos aromáticos, que son responsables del incremento de la CIC y la reactividad del biocarbón en el suelo (Liang *et al.*, 2006). En comparación con otros tipos de materia orgánica, el biocarbón es capaz de adsorber fuertemente aniones fosfato, aunque su mecanismo aún no se conoce (Lehmann, 2007). Esto es debido a que las cargas superficiales del biocarbón también pueden ser positivas, principalmente en los biocarbones recién preparados, aunque a medida que avanza el envejecimiento del biocarbón tiene más cargas negativas que positivas y muestra un aumento en la acidez superficial y decrece la basicidad (Cheng y Lehmann, 2009). Los cambios en las cargas superficiales están correlacionados muy fuertemente con el tiempo y las temperaturas anuales medias. Los biocarbones maduros presentan mayor valor de CIC que los jóvenes, por su contacto con el oxígeno y el agua (Cheng *et al.*, 2008). Asimismo disminuye conforme al pH del biocarbón, y tienen valores muy bajos en pH bajo y se incrementa con el pH alto, pero el punto en el que la CIC tiene el valor de cero (punto de carga neta cero) depende de la temperatura a la cual se produjeron. La

CIC potencial (a pH 7), el pH y el área superficial de biocarbón recién producido parecen incrementarse con la temperatura de la pirólisis, de modo que la temperatura óptima es probablemente entre 450 y 550 °C (Lehmann, 2007).

Novak *et al.* (2010) investigaron la química superficial de un biocarbón derivado de cáscara de nuez y revelaron los principales grupos funcionales existentes como hidroxil fenólico, C=O aromático, grupos alifáticos, entre otros. La caracterización de un biocarbón no fresco reveló que contiene una gran fracción de benceno y cantidades significativas de otros compuestos aromáticos como tolueno, benzonitrilo e hidrocarburos aromáticos policíclicos, además de éteres y ésteres metílicos aromáticos dentro de su estructura (Kaal *et al.*, 2008). También fueron encontrados herbicidas adsorbidos en el interior de un biocarbón de trigo (Hiller *et al.*, 2007).

Con respecto a sus propiedades físicas, el biocarbón es un sólido carbonoso, de color negro, con una superficie intrincada y desordenada y características estructurales que varían por el tipo y tiempo de la pirólisis, aunque en general es amorfo según estudios de microscopía electrónica de barrido realizados por Qiu *et al.* (2008). Posee una alta porosidad, por lo cual lo han comparado con un “arrecife subterráneo” que puede ser hábitat para microorganismos, con micro, meso y macroporos, cuyos tamaños van de <2 nm, 2-50 nm y >50 nm, respectivamente (Rouquerol *et al.*, 1999; Downie *et al.*, 2009). Los macroporos provienen de los espacios propios de la materia prima original, mientras que los microporos son debidos al proceso de pirólisis, de manera que al aumentar la temperatura aumenta la microporosidad, además esta propiedad ocasiona que haya más área de carga reactiva. Los microporos están asociados a la adsorción de gases, de compuestos líquidos y sólidos (Verheijen *et al.*, 2009), mientras que los macroporos permiten el transporte rápido del adsorbato en el interior, para su posterior difusión en el volumen de microporos, ayudando al transporte de moléculas concentradas por ellos (Martínez *et al.*, 2006). El biocarbón está constituido por partículas de diferentes tamaños, una fracción particulada, lo que depende de la fuente y tamaño de materia prima (Lehmann, 2007). Presenta muy baja densidad aparente, entre 0.30 a 0.43 g cm⁻³ para biocarbones producidos de diferentes tipos de madera y en diferentes tipos de hornos (Pastor *et al.*, 1993). Con una muy alta área superficial, entre 200 y 400 m² g⁻¹ (Kishimoto y Sugiura,

1985), aunque se han encontrado valores de 3.64 y 14.14 m² g⁻¹ para dos biocarbones producidos de una pasta de semilla de cártamo prensado, bajo una atmósfera estática de nitrógeno (Angin y Sensoz, 2011), pero algunas veces excede de 1000 m² g⁻¹, lo cual es importante por su efecto sobre la capacidad de retener nutrientes y agua (Downie *et al.*, 2009). Dos biocarbones derivados de residuos de fábrica de papel de pirólisis lenta, presentaron valores de 2.9 a 114.9 m² g⁻¹ (van Swieten *et al.*, 2010^a).

Sin embargo, debe considerarse que el biocarbón experimenta cambios químicos y estructurales durante los procesos de “envejecimiento”, es decir, con el tiempo (Cheng y Lehmann, 2009).

Efectos del biocarbón sobre las propiedades, procesos y funciones del suelo

Propiedades del suelo. Cuando se incorpora biocarbón al suelo se pueden alterar las propiedades físicas tales como la textura, la estructura, la distribución del tamaño de poro, el área superficial total, y la su densidad aparente, con repercusión en la aireación, capacidad de retención de humedad, crecimiento de las plantas y facilidad de laboreo del suelo. Además, puede suceder que partículas muy pequeñas de biocarbón bloqueen parcial o totalmente los poros del suelo con efectos primeramente en la estructura, la hidrología, y la disminución de la infiltración. Por sus valores muy bajos de densidad aparente, la adición de biocarbón al suelo puede reducir también la densidad del suelo, con la mejora de muchos procesos del mismo; sin embargo, puede suceder lo contrario si las partículas pequeñas llenan esos espacios porosos sin realmente mezclarse con el suelo (Downie *et al.*, 2009).

Funciones en el suelo. El biocarbón incrementa normalmente la capacidad de intercambio catiónico y, por lo tanto, la retención de NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, probablemente por su gran superficie específica, mayor carga superficial negativa y mayor densidad de carga como se mencionó, aún cuando no se ha dilucidado claramente este hecho. El nitrógeno de la biomasa original puede no estar realmente disponible, el fósforo generalmente es conservado durante la volatilización de moléculas orgánicas asociadas y está presente como cenizas dentro del biocarbon, al solubilizarse, queda disponible para las plantas (Mašek

and Brownsort, 2011). Asimismo el biocarbón puede suministrar potasio en ciertas cantidades a los cultivos (Tenenbaum, 2009). Es un agente que aumenta la adsorción de compuestos orgánicos como herbicidas, pesticidas, enzimas aplicados al suelo. Algunas evidencias muestran que hay un incremento en la población de hongos micorrízicos, y mayores niveles de infección por *Rhizobium* y que su uso en remediación de suelos funciona como portador de microorganismos (Amonnette, 2009). Existen indicios de que su aplicación indujo respuestas en las rutas de resistencia sistémica adquirida y resistencia sistémica inducida en el dosel de plantas de tomate inoculadas con *Botrytis cinerea*, con una capacidad de control de amplio espectro y que esta mejora en la respuesta de las plantas a la enfermedad puede ser uno de los beneficios del biocarbón, lo que sugiere así una resistencia al estrés biótico (Elad *et al.*, 2011). También disminuye los niveles de gases con efecto invernadero, detiene la acidificación de los océanos por absorción de CO₂ (Amonnette, 2009) y su empleo condujo al secuestro neto de carbono de la atmósfera al suelo, con un incremento del carbono orgánico del suelo y una disminución de las emisiones de óxido nitroso y metano de los suelos, (Gathorne *et al.*, 2009). Las mejoras del suelo atribuidas a la adición de biocarbón incluye el incremento en la retención de humedad, en la permeabilidad del aire, en el poder amortiguador del carbono orgánico soluble e interacciones sinérgicas con poblaciones microbianas del suelo (McLaughlin, 2009). La permeabilidad del agua del suelo aumentó al aplicar biocarbón al suelo (Asai *et al.*, 2009). Además, mejoró el suministro de nutrientes para los cultivos, así como las propiedades físicas y biológicas (Gaunt y Lehmann, 2008; Gaunt y Cowie, 2009; Laird, 2010). Esto dio lugar a un incremento en el rendimiento del cultivo por unidad de fertilizante aplicado (eficacia del fertilizante) en agricultura intensiva así como reducciones de escorrentía, erosión y pérdidas gaseosas. También fue demostrado en Australia (Chan *et al.*, 2007) y en el Reino Unido (Gathorne *et al.*, 2009) que mejoró la aireación del suelo e hizo más fácil el laboreo. Los costos de la aplicación de riego fueron menores con el uso de biocarbón (De Gryze *et al.*, 2010). En suelos que requieren ser encalados, el biocarbón provocó mejoras en el balance del pH (Granatstein *et al.*, 2009; Amonnette, 2009).

Aún cuando la mayoría de estudios demuestran el efecto benéfico del biocarbón, es necesario notar que algunos investigadores no han obtenido los mismos resultados. Por ejemplo, van Swieten *et al.* (2010), ensayaron su uso en un suelo australiano calcáreo, con una aplicación de 4.5 ton acre⁻¹ (11.1 ton ha⁻¹) de dos biocarbones. Los resultados mostraron un incremento en el contenido de carbono total pero no de los nutrimentos extraíbles. Esto hizo que especularan que fue resultado del pH inicial del suelo (7.7), del contenido de Ca²⁺ (21.7 me 100 g⁻¹) y del pH alcalino de ambos biocarbones (8.2 y 9.4). Por su parte, McClellan *et al.* (2007), en un estudio en macetas con suelos de cenizas volcánicas, fértiles y cultivados, usaron un biocarbón de cáscara de nuez macadamia de carbonizado ultrarrápido, con cuatro tratamientos: 0, 5, 10 y 20%, y con lechuga como planta indicadora, obteniendo mejores resultados con el testigo y con biocarbón al 5%, en la biomasa de las plántulas de lechuga y al consumo de nitrógeno. En el suelo, se demostró que el mejor tratamiento fue el de 20% con respecto al mayor contenido de fósforo y carbono. Con tales resultados, dichos investigadores realizaron otro experimento pero con un suelo infértil y usando maíz, en el cual probaron el biocarbón, con y sin fertilización NPK y cal. El mejor tratamiento fue cuando se aplicó la fertilización NPK y cal, sin biocarbón, siguiendo el que se le adicionó 5% de biocarbón, fertilización NPK y cal, mientras que el control fue mejor que el suelo con 5% de biocarbón, lo que significa que resultó negativo el uso del biocarbón sin adición de fertilizante y cal. Ellos entonces consideraron el contenido de la materia volátil (MV) como una medida de la susceptibilidad del biocarbón a degradarse y formar carbono cuando es calentado. Para ello midieron este parámetro y además comprobaron que a mayor contenido de MV había mayor repelencia del biocarbón al agua con desigual infiltración. Asimismo hicieron otros experimentos donde probaron una mezcla de suelo muy degradado y 10% de dos biocarbones con bajo y alto contenido de MV, respectivamente, incluyendo tratamientos con y sin adición de fertilización NPK y cal, así como el control, en un cultivo de maíz. McClellan *et al.* (2007) demostraron al evaluar la biomasa fresca de maíz, que el mejor tratamiento fue biocarbón con menor MV, NPK y cal, pero estadísticamente al que sólo se usó fertilización NPK y cal. Los otros tratamientos tuvieron valores muy bajos. Este comportamiento sugirió que es necesario conocer la calidad del biocarbón usado, en particular de este parámetro para usarlo como mejorador del suelo. Por su parte, Unger y Killorn

(2011) probaron biocarbón en un cultivo de maíz, con y sin aplicación de fertilizante químico, sin ningún efecto por la aplicación del biocarbón y sí del fertilizante.

Un concepto importante del biocarbón que debe conocerse es su Capacidad de Carga (CCB), que es la cantidad máxima de carbono en forma de biocarbón que puede ser adicionada a los suelos de manera segura sin comprometer otras funciones de éste o del ambiente en general. Ya que no está claro cuál es esa cantidad es importante determinar si esa CCB de biocarbones producidos con diferentes materias primas y procesos varía en diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales (Verheijen *et al.*, 2009). En un suelo tropical intemperizado se determinaron cargas superiores a 140 ton ha⁻¹ (Lehmann y Rondon, 2006). En un experimento en frijol, hubo efectos positivos en el rendimiento con aplicaciones de biocarbón arriba de 50 ton ha⁻¹, que desaparecieron cuando aumentó a 60 ton ha⁻¹, lo que llevó a considerar que dependió del cultivo, del clima y del suelo (Rondon *et al.*, 2007). Como la aplicación de biocarbón al suelo es una acción irreversible, se destaca la naturaleza compleja para calcular la CCB adecuada para los cultivos. Es necesario considerar no sólo los efectos sobre la productividad de la planta sino sobre otros aspectos como son la biología del suelo o el transporte de partículas finas del biocarbón a través del agua superficial y subterránea, o pensar en la cantidad total y las dosis de aplicación con respecto al tiempo. Por último tomar en cuenta el riesgo de una combustión espontánea en el suelo (Verheijen *et al.*, 2009). De ahí la necesidad de enfocar la investigación de biocarbón sobre este aspecto, lo que involucra una recopilación de resultados de experimentos en campo, que son pocos y una gran cantidad de experimentos en diferentes agroecosistemas.

En un experimento de campo realizado durante tres años se evaluó el efecto de un biocarbón con distintas aplicaciones y dosis de fertilizante nitrogenado (urea) en un cultivo continuo de maíz. Se realizaron muestreos de suelo durante el crecimiento y después de la cosecha y se determinó el contenido de nitrógeno, en su forma nítrica y amoniacal. Además se evaluó éste en la planta y en el grano, así como el rendimiento de grano y biomasa de planta, sin obtener diferencias entre los tratamientos que usaron biocarbón con y sin fertilizante, pero sí hubo

una respuesta de la sola aplicación de fertilizante en el rendimiento de grano, de biomasa, de acumulación de nitrógeno en el grano, de nitratos y amonio en el suelo (Unger y Killorn, 2011).

Efectos en los procesos del suelo. Brendová *et al.* (2012) aplicaron biocarbón derivado de estiércol con muy alta área específica a un suelo y demostraron la retención de elementos metálicos o contaminantes donde se incrementó la retención de cadmio de manera efectiva, pero hubo mayor capacidad de retención de metales pesados en un biocarbón de cáscarilla de semilla de algodón. En un cultivo de arroz en suelos contaminados con cadmio, se encontraron resultados similares usando biocarbón como adsorbente, no observando diferencia entre los tratamientos y el control con respecto al rendimiento del grano (Cui *et al.*, 2011). También se presentaron procesos de adsorción de compuestos hidrofóbicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorinados, pesticidas y herbicidas en suelos y sedimentos (Verheijen *et al.*, 2009).

Métodos de aplicación al suelo

Para realizar una aplicación de biocarbón debe considerarse el tipo de suelo, las prácticas de cultivo, el clima, la erodabilidad del suelo, la forma de aplicación al contar o no con maquinaria, ya sea superficial (0 a 30 cm.) en la cual se homogeneiza con el suelo, o la profunda (>30 cm.) que generalmente se realiza en banda o muy cercanas a las raíces, lo que evita la posibilidad de erosión del suelo. También el clima debe ser considerado pues debe aplicarse cuando no hay viento y humedecerlo para evitar pérdidas en el aire. Puede emplearse en forma de perdigones junto con otro tipo de mejoradores como abonos o compostas y las cantidades aplicadas deben estar basadas en resultados experimentados. Dosis de 5 a 50 ton ha⁻¹ usadas con una gestión correcta de fertilización, dieron efectos positivos sobre el rendimiento de cultivos. Además, no es necesario aplicarlo repetidamente en un cultivo como en el caso de abonos o compostas, ya que su efecto perdura en el suelo debido a su recalcitrancia (Major, 2010).

Investigaciones realizadas con biocarbón a nivel de invernadero y campo

Muchos investigadores (Glaser *et al.*, 2001; Lehmann and Rondon, 2006; Blackwell, *et al.*, 2007; Downie *et al.*, 2007; Baronti *et al.*, 2010; Laird *et al.*, 2010;

Cui *et al.*, 2011; Sukartono *et al.*, 2011; Cornelissen *et al.*, 2013) han realizado estudios para probar el efecto de diferentes biocarbones en la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos y han encontrado efectos en el aumento de la producción de los cultivos y mejora de las propiedades del suelo, pero solo citaremos algunos.

En un experimento de 2007 a 2010, se comparó, en campo, el efecto de dos biocarbones (camas avícolas y residuos de fábricas de papel), en una rotación cereal-leguminosa con la práctica normal del agricultor, aplicación de cal y composta, y una fertilización con productos químicos con NPK. Antes del cultivo de verano se aplicaron 10 t ha⁻¹ de cada biocarbón, 3 t ha⁻¹ de cal y 25 t ha⁻¹ de composta húmeda. Se sembró maíz dulce en verano seguido de habas en invierno. Los resultados revelaron que aun siendo muy diferentes las características de los biocarbones, tanto en su contenido de nutrientes como en su capacidad para encalar, ambos influenciaron la química del suelo con disminución de su acidez e incremento de nitrógeno, fósforo, capacidad de intercambio catiónico y carbono (Van Swieten *et al.*, 2010b).

Asai *et al.* (2009) condujeron una investigación en campo en la que se evaluó el efecto de un biocarbón producido con madera de teca y palo de rosa aplicados a un cultivo de arroz en un suelo alcalino en Laos, a una dosis de 3.6 ton acre⁻¹ (8.9 ton ha⁻¹) y el tratamiento testigo. Se produjo un incremento en el rendimiento en dos de los tres sitios experimentales y concluyeron que probablemente fue por un aumento en la cantidad de fósforo disponible para la planta como consecuencia de la aplicación.

Tenenbaum (2009) consignó en un estudio en macetas que una combinación de biocarbón y fertilizante incrementó la productividad del 25-50% en trigo invernal, espinaca, pimiento verde, jitomate y otros cultivos sobre el tratamiento que sólo se le aplicó fertilizante.

Secuestro de Carbono y Cambio Climático

La agricultura y el cambio climático están fuertemente ligados, ya que la actividad agrícola contribuye a la formación de gases efecto invernadero en un alto porcentaje del total emitido (Sohi *et al.*, 2009), sobre todo por el uso no racional

de fertilizantes y las prácticas de cultivo (Martínez, *et al.*, 2008). En México representa un 6.4 % del total de emisiones de gases efecto invernadero (INEGI, 2009). Asimismo, la actividad forestal, por la deforestación y los incendios provocados de los bosques y la pecuaria, por los rumiantes, que aporta, ésta última, el 14.5% del total de emisiones de gases efecto invernadero de origen humano (Maserá *et al.*, 1997; FAO, 2013), y el cambio en el uso de la tierra (Akala and Lal, 2001).

Uno de los beneficios que se espera por el uso de biocarbón es su potencial para mitigar significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir así a retardar el cambio climático. En el ciclo del carbono las plantas toman CO₂ de la atmósfera para la fotosíntesis y al morir forman parte de la materia orgánica del suelo, la cual ha capturado el carbono en sus estructuras. Sin embargo, la mayor parte de esta materia es mineralizada por los microorganismos del suelo con liberación de CO₂ a la atmósfera, además del producido por la respiración de las plantas. Al estar balanceadas las cantidades de CO₂ absorbidas y liberadas en este sistema, se considera como carbono neutral, es decir, que no aumenta la cantidad neta de este gas en la atmósfera. Entre los gases efecto invernadero se encuentran el CH₄, NO₂, CO₂ y, en este último caso, la adición neta de carbono a la atmósfera representa el carbono positivo. Finalmente el carbono negativo se refiere a la reducción de la adición neta de este gas a la atmósfera. Cuando se produce biocarbón se están ocupando residuos de biomasa que formarían parte de materia orgánica del suelo, de la cual se usa un porcentaje en la producción de energía y otro en la producción de biocarbón. En el primer caso se libera hacia la atmósfera parte del carbono en forma de CO₂ como un proceso de carbono neutral, y cuando se aplica biocarbón al suelo, como el carbono está en forma recalcitrante, tarda mucho tiempo en degradarse, convirtiéndose en carbono negativo (Schahczenski, 2010).

Para tener un conocimiento concreto de ese potencial del biocarbón para que el carbono sea retenido por más tiempo en el suelo, debe considerarse tanto la eficiencia energética como las emisiones de gases de efecto invernadero a través de un análisis de ciclo de vida del biocarbón. Este es un método que se usa para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad a lo

largo de la vida útil, con la cuantificación de la energía, los recursos y las emisiones así como la evaluación de su efecto en el ambiente global (Schahczenski, 2010). Sin embargo, estudios realizados por algunos investigadores (Gaunt y Lehmann, 2008; Lehmann y Joseph, 2009; Roberts, 2010) mostraron que el biocarbón sí produjo una reducción neta de la emisión de dichos gases y que el uso de la biomasa fue eficiente desde el punto de vista energético. Gaunt y Lehmann (2008) mostraron, además, que la producción de biocarbón redujo de dos a cinco veces más las emisiones de gases de efecto invernadero que la sola producción de energía de la misma biomasa.

La producción de biocarbón de manera sostenible y su adición al suelo como mejorador, sí tiene un potencial técnico para contribuir de manera importante en la mitigación del cambio climático y Woolf *et al.* (2010) en un análisis concluyeron que era posible una disminución de las emisiones de carbono equivalente de CO₂, en el orden de 1.8 Pg CO₂-C_e anualmente, y 130 Pg CO₂-C_e en un siglo, considerando los niveles actuales de disponibilidad de materia prima, con la preservación de la biodiversidad, la estabilidad del ecosistema y la seguridad alimentaria. Esa capacidad del biocarbón de contribuir al secuestro del carbono y disminuir el CO₂ atmosférico contribuye a mitigar el cambio climático, requiere procesar residuos de biomasa y tecnologías adecuadas, pero respetando las áreas de cultivo o selvas y bosques, de manera que no se provoque un problema entre la seguridad alimentaria, la producción de biocombustibles y la conservación del ambiente (Tilman *et al.*, 2009). Mediante el análisis del ciclo de vida del biocarbón se demostró que hay reducción de emisiones de gases efecto invernadero de diversas magnitudes, debido a los tipos de materia prima y sistemas de pirólisis empleados para producir el biocarbón (De Gryze *et al.*, 2010). En un estudio realizado por Cayuela *et al.* (2010) se usaron subproductos de la obtención de biocombustibles como mejoradores de suelos, entre ellos biocarbón, que mostró un alto potencial para la mitigación del cambio climático debido a su capacidad de incrementar el contenido de carbono estable en el suelo con un valor superior, en este sentido, a los demás subproductos. La incorporación de biocarbón al suelo secuestra carbono de forma sostenible, ya que en su obtención, por medio de la pirólisis de biomasa, en particular de los bosques, se concentra y almacena en promedio aproximadamente el 50% del

contenido de carbono original de la biomasa muerta que es permanente. El resto de la biomasa se descompone rápidamente a una forma más estable y se liberan gas y aceites que pueden ser capturados como fuente de energía, reduciendo así las emisiones de gases (Shrestha *et al.*, 2010).

En una estimación efectuada por la Iniciativa Internacional de Biochar (2009) se consideró que si el 2.1% del carbono anual fotosintetizado e incorporado en las plantas pudiera usarse para producir biocarbón, con una eficiencia de carbonización del 40%, podría secuestrarse 0.5 billones de toneladas del carbono de la atmósfera.

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y Desertificación, en 2009, determinaron que el biocarbón podría ser considerado como una estrategia de mitigación para las negociaciones del segundo periodo del Protocolo de Kyoto que iniciará en 2013. Sin embargo, existen algunos cuestionamientos si esto sucederá en todos los ambientes, por lo cual sugieren más investigaciones no sólo a nivel de laboratorio sino de campo (Bracmort, 2009; Shrestha *et al.*, 2010).

Riesgos para la salud

Parece que algunos biocarbones pueden presentar contenidos de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), dioxinas, furanos, metales ligeros y pesados, dependiendo de las materias primas y de las temperaturas de procesamiento, si éstas exceden de 1000°C. Sin embargo, se ha mencionado que la mayoría no los presenta o están en cantidades mínimas, lo que no es un riesgo para la salud. Sin embargo, cuando provienen de incineración de vertederos y residuos sólidos municipales sí pudieran tener contaminantes (Verheijen *et al.*, 2009; Sohi *et al.*, 2010). El biocarbón producido de cáscarillas de arroz con muy altas temperaturas en el proceso, podría originar compuestos cancerígenos. Además deben tenerse precauciones para no inhalar las partículas más pequeñas del biocarbón que pueden producir problemas respiratorios o gástricos, por lo que es recomendable usar ropa adecuada y mascarillas (Major, 2010). Sin embargo, es necesaria mayor investigación sobre el impacto de la producción de biocarbón en la salud y en la seguridad (Mills, 2012).

Manejo, transporte y almacenamiento

El tamaño de las partículas de biocarbón definirá el manejo y transporte que se le debe dar con el fin de evitar que el aire se llene de polvo de biocarbón con los subsecuentes riesgos de contaminación al ambiente o como se mencionó en la salud humana. Existen evidencias que el biocarbón almacenado en espacios cerrados tiene un potencial pirofórico, con referencia a los informes de polvo de carbón en minas. Por ello, el aperdigonado del biocarbón puede evitar este problema, así como su humedecimiento o el uso de retardantes de fuego como el ácido bórico, el sulfato ferroso, o usar gases inertes para remover el oxígeno atmosférico. No debe tenerse almacenado en zonas urbanas o almacenes (Lehman and Joseph, 2009; Verheijen *et al.*, 2009).

Factibilidad económica, tecnológica y social en México para producir biocarbón

En el mundo se han realizado pocos estudios económicos (Swieten, 2010a; Pratt y Moran, 2010; Thomas, 2010; Granatstein *et al.*, 2010) de la producción y aplicación de biocarbón como mejorador de suelo. Es importante fundamentar el manejo del biocarbón en el estudio económico de su ciclo. En ese contexto es necesario considerar: 1) el costo de la producción, que incluye la producción de biomasa –en caso de tener este fin-, el de la colecta, transporte y almacenamiento de las materias primas, costos de la tecnología de producción junto con la compra de equipo, mantenimiento, depreciación, trabajo, la escala de producción, entre otros; 2) los costos de transporte, almacenamiento y aplicación del biocarbón; 3) el beneficio económico por los cambios en el suelo que producen un aumento en la productividad, y 4) el ingreso económico que podría obtenerse por el secuestro de carbono al aplicarlo al suelo si se logra sea considerado para créditos de carbono. Sin embargo, el beneficio social es lo más importante, porque se ha comprobado que la adopción y permanencia de una práctica depende de este factor, ya que el productor considera la tenencia de la tierra, el cultivo, las dinámicas de la agricultura en el contexto social más amplio (Leach, 2010), sobre todo los riesgos e incertidumbres que una nueva tecnología puede imponer a las personas y al ambiente, así como la comprobación de los beneficios que produce esta tecnología.

En el experimento realizado durante cuatro años por van Zwieten *et al.* (2010^a) con la aplicación de dos biocarbones derivados de residuos de fábrica de papel y de camas de pollo en una rotación cereal-leguminosa, mostraron que la producción aumentó con ambos biocarbones comparado a los demás tratamientos que correspondieron al manejo del productor, encalado con 3 t ha⁻¹ y uso de composta húmeda a razón de 25 t ha⁻¹, produjo ganancias económicas, ya que con respecto a la práctica del productor, el incremento neto fue de 2,480 dólares por hectárea con el biocarbón de residuos avícolas y con el biocarbón de fábrica de papel fue aún mayor.

Por ello es conveniente realizar el estudio económico que defina claramente los beneficios y considerar además el impacto social que ello implicaría, porque en este momento es una tecnología que se desconoce y que no se ha aplicado en México. Si se piensa en la cantidad de residuos de cultivos que se desperdician o que son mal empleados, habría un gran potencial para ello, y lo conveniente sería promover el desarrollo de tecnologías limpias de pirólisis para producir este mejorador y preferentemente de manera local que reduciría costos de transporte de biomasa y biocarbón.

1.3 CONCLUSIONES

El estudio del biocarbón a nivel mundial tiene mucho auge pues se considera una tecnología que puede aumentar la fertilidad de los suelos y aumentar el rendimiento de los cultivos, el secuestro de carbono, el efecto positivo sobre el cambio climático y la obtención de créditos de carbono. Sin embargo, falta mucho conocimiento en el efecto a largo plazo del uso del biocarbón en los suelos y en el ambiente, ya que la investigación a nivel de campo ha sido limitada. Asimismo, la caracterización de los biocarbones para definir las propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas y biológicas que son las que determinan su comportamiento en el suelo y en la eficacia en la mejora de la calidad es aún muy poca. Considerando la infinita gama de agroecosistemas en el mundo, y la gran diversidad de biocarbones por los parámetros empleados en su producción, que considera las materias primas, las condiciones del proceso de pirolisis, así como su uso como mejorador de suelos, como dosis, forma de aplicación, entre otros. Es necesario

recalcar que puede haber diversas respuestas en los cultivos en diferentes ambientes. En México es necesario impulsar esta tecnología para obtener tales beneficios para lo cual es necesario la realización de investigación que permita comprobar los resultados que muchos investigadores han confirmado, para que sea utilizada por los productores agrícolas por rentabilidad, seguridad en la salud y seguridad alimentaria.

De esta manera, puede considerarse que el uso del biocarbón como una tecnología que se ha demostrado provee beneficios al suelo aumentando su fertilidad a través de su influencia en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como su capacidad para ayudar al secuestro de C en el suelo, tiene gran futuro en la medida que se le considere como tal y tenga apoyo para probarlo en diferentes agroecosistemas de México, ya que la factibilidad de su obtención y aplicación podría llevarse a cabo directamente en el campo, aprovechar los residuos de las labores agrícolas y disminuir los costos, con los beneficios mencionados.

1.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akala V. A. and R. Lal. 2001. Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed minesoils in Ohio. *Journal of Environmental Quality* 30: 2098-2104.
- Amonette, J. 2009. "An introduction to biochar: Concept, processes, properties, and applications". *Harvesting Clean Energy* 9. Special Workshop. USA.
- Angin, D. and S. Sensoz. 2011. Caracterización of bio-chars obtained at static and nitrogen atmosphere. 6th International advanced technologies symposium (IATS'11), Elazig, Turkey. 191-193 pp.
- Antal Jr. M.J. and M. Grönli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 42(8): 1619-1640.
- Asai, H., K. Benjamin, M. Haefele, S. Khamdok, H. Koki, K. Yoshiyuki, I. Yoshio, S. Tatsuhiko, and H. Takeshi. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research* 111 (1-2):81-84.
- Baccile, N., M. Antonietti and M.M. Titirici. 2010. One-step hydrothermal synthesis of nitrogen-doped nanocarbons: Albumine directing the carbonization of glucose. *ChemSusChem* 3: 246-253.
- Baldock, J.A. and R.J. Smernik. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red Pine) wood. *Organic Geochemistry* 33:1093-1109.

- Baronti, S., G. Alberti, G. Vedove, F. Di Gennaro, G. Fellet, L. Genesio, F. Miglietta, A. Peressittu, F. Vaccari. 2010. The biochar option to improve plant yields: First results from some field and pot experiments in Italy. *Ital. J. Agron./Riv. Agron.* 2010 (5): 3-11.
- Blackwell, P., Shea, S., Storer, P., Solaiman, Z., Kerkmans, M. and Stanley, I. 2007. Improving wheat production with deep banded oil mallee charcoal in Western Australia. First Asia Pacific Biochar Conference, Terrigal, Australia.
- Bracmort, K. 2009. Biochar: Examination of an emerging concept to sequester carbon. Congressional research service. USDA. USA. http://www.eoearth.org/files/177501_177600/177531/r40186.pdf. Marzo de 2013.
- Brendová, K., P. Tlustos, J. Száková, J. Habart. 2012. Biochar properties from different materials of plant origin. *Eur. Chem. Bull.* 1(12), 535-539.
- Brick, S. 2010. Biochar: assessing the promise and risks to guide U.S. Policy. Natural resources defense council. U.S.A. http://www.nrdc.org/energy/files/biochar_paper.pdf. Enero de 2011.
- Cayuela, M.L., P.J. Kuikman, O. Oenema, R.R. Bakker, J.W. Groenigen. 2010. Bioenergy residues and biochar as soil amendments: Climate-relevant C and N dynamics during decomposition in soil. Use of manures and organic wastes to improve soil quality and nutrient balances. http://www.ramiran.net/ramiran2010/docs/Ramiran2010_0319_final.pdf. Marzo 2013.
- Chan, K.Y., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45:629-634.
- Chan, K.Y., Xu, Z., 2009. Biochar: Nutrient properties and their enhancement. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Lehmann, J. & Joseph, S. ed.), Earthscan.
- Cheng, C. and J. Lehmann. 2009. Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere* 75, 1021-1027.
- Cheng, C.H., Lehmann, J. and Engelhard, M.H. 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.
- Cornelissen, G., V. Martinsen, V. Shitumbanuma, V. Alling, G. Breedveld, D. Rutherford, M. Sparrevik, S. Hale. 2013. Biochar Effect on Maize Yield and Soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia. *Agronomy* 2013, 3:256-274. Disponible en: www.mdpi.com/journal/agronomy. Junio 2013.
- Cui, L., L. Li, A. Zhang, G. Pan, D. Bao and A. Chang. 2011. Biochar amendment greatly reduces rice Cd Uptake in a Contaminated Paddy Soil: A Two-Year Field Experiment. *Bioresources* 6(3), 2605-2618. Bioresources.com. Enero de 2012.
- Czernik, S. and A.V. Bridgwater. 2004. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy Fuels.* 18(2):590-598.
- De Gryze, S., Cullen D.M., Durschinger L. 2010. Evaluation of the opportunities for generating carbon offsets from soil sequestration of biochar. Climate action reserve. Terra Global Capital. LLC. http://www.climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2009/03/Soil_Sequestration_Biochar_Issue_Paper1.pdf Junio de 2010.

- Demirbas, M.F. 2009. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Applied Energy* 86: S151-S161.
- Downie, A., Crosky, A., Munroe, P., 2009. Physical properties of biochar. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Eds. Lehmann, J. & Joseph, S.), Earthscan.
- Downie, A., Klatt P., Downie R., Munroe P. 2007. Slow pyrolysis: Australian demonstration plant successful on multi-feedstocks. *Bioenergy 2007 Conference*, Jyväskylä, Finland.
- Elad, Y., E. Cytrin, H.Y. Meller, B. Lew and E.R. Graver. 2011. The Biochar effect: plant resistance to biotic stresses. *Phytopathologia Mediterranea*. Vol. 50, No. 3. Marzo 2012.
- Falcao, N. 2012. In: *Pesquisadores garipam a história contida na terra preta de índio*. Natureza (ed).
<http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-de-indio.html>. Junio 2012.
- FAO. 2013. Major cuts of greenhouse gas emissions from livestock within reach. D <http://www.fao.org/news/story/en/item/197608/>. Octubre 2013.
- Farag, I.H., LaClair C.E. & Barrett C.J.. 2002. Technical, environmental and economic feasibility of bio-Oil in New Hampshire's north country. New Hampshire industrial research center. www.unh.edu/p2/biooil/bounhif.pdf. Octubre 2011.
- Fortis, H.M., Salazar, S.E., Orono, C.I., Leos, R.J., Cruz, R.J., Montemayor, T.J., García, S.J. y Aldaco, N.R. 2007. Estadísticas de la Producción Orgánica. En: *Uso y aprovechamiento de abonos orgánicos e inocuidad*. 2007. Edit. Enrique Salazar Sosa *et al.* Gómez Palacio Durango, México, Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, Sociedad mexicana de la ciencia del suelo, COCyTED.
- Funes-Monzote, F. & Monzote, M. 2001. Unir en un todo coherente una opción sustentable y productiva. Experiencia cubana de integración ganadería-agricultura sobre bases agroecológicas. *Boletín de ILEIA*. 16 (4): 22.
<http://www.leisa-al.org/web/images/stories/revistapdf/vol16n4.pdf>
- Gathorne-Hardy, A., J. Knight, and J. Woods. 2009. Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertiliser to improve barley yields in the UK. Presented at IOP conf. series: Earth and Environ. Sci. 6: Climate change: Global risks, challenges and decisions. Paper P37.45.
- Gaunt, J.L. and Cowie A. 2009. Biochar, greenhouse gas accounting and emissions trading. In: *Biochar for Environmental Management* (Lehmann, J. and Joseph, s. ed.), pp.317-340. Earthscan, London.
- Gaunt, J.L. and J. Lehmann. 2008. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. *Environmental Science & Technology*. 42, No. 11: 4152-4158.
- Gheorghe, C., Marculescu, C., Badea, A., Dinca, C., Apostol, T. 2009. Effect of pyrolysis conditions on bio-char production from biomass. *Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conf. on Renewable Energy Sources*, July 1-3 2009, Tenerife Canary Island, Spain. pp. 239-241.
- Glaser, B., L. Haumaier, G. Guggenberger, & W. Zech. 2001. The Terra Preta phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88: 37-41.
- Gorou, P. 1949. Observações geográficas na Amazonia. *Revista Brasileira de Geografia* 11: 354-408.

- Granatstein, D., Kruger C.E., Collins H., Galinato S., Garcia-Perez M. and Yoder J. 2009. Use of biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment. Final report. Center for sustaining agriculture and natural resources. Washington State University. Wenatchee, Washington. USA.
- Hammes, K., RJ Smernick, JO. Skjemstad, A. Herzog, UF. Vogt, MWI. Schmidt. 2006. Synthesis and characterisation of laboratory-charred grass straw (*Oriza sativa*) and chesnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. *Organic Geochemistry*. 37: 1629-1633.
- Hayes, J. D. 2009. An examination of biorefining processes, catalysts and challenges. *Catalysis Today* 145:138-151.
- Hiller, E., A. Fargasova, L. Zemanova, M. Bartal. 2007. Influence of wheat ash on the MCPA immobilization in agricultural soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 78: 345-348.
- INEGI. 2009. ii. National greenhouse gas emissions inventory. Fourth National Communication of Mexico. 1990-2006. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/654/nationalgreenhouse.pdf>
- INEGI. 2013. "Estadísticas a Propósito del Día Mundial de la Justicia Social". <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2013/justicia0.pdf>. Octubre 2013.
- International Biochar Initiative. 2012. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. www.biochar-international.org. Mayo de 2012.
- International Biochar Initiative. How much carbon can biochar systems offset-and when? http://www.biochar-international.org/images/final_carbon.pdf. October 2009.
- Ippolito, K.; Lentz R., Novak J., Spokas K., Collins H. and Streubel J.. 2011. Biochar. Usage: pros and cons. Western Nutrient Management Conference. Vol. 9.: 93-98.
- Ishii T and K. Kadoya. 1994. Effects of charcoal as a soil conditioner on citrus growth and vesicular–arbuscular mycorrhizal development. *J Jap Soc Hortic Sci* 63:529–535.
- Kaal, J., S. Brodowski, J.A. Baldock, K.G.J. Nierop, C.A. Martínez, C. 2008. Characterisation of aged black carbon using pyrolysis-GC/MS, thermally assisted hydrolysis and methylation (THM), direct and cross-polarisation ¹³C nuclear magnetic resonance (DP/CP NMR) and the benzenepolycarboxylic acid (BPCA) method. *Organic Geochemistry* 39:1415-1426. [http://igitur-archive.library.uu.nl/geo/2008-1205-200355/Organic%20Geochemistry%2039%20\(2008\)%2010.pdf](http://igitur-archive.library.uu.nl/geo/2008-1205-200355/Organic%20Geochemistry%2039%20(2008)%2010.pdf). Enero 2010.
- Kern, D.C., N. Kämpf. 1989. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com terra preta arqueológicas na região de Oriximiná – PA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 13, 219–225.
- Kimetu, J.M., J.Lehmann, S.O. Ngoze, D.N. Mugendi, J.M. Kinyangi, S. Riha, L. Verchot, J.W. Recha and A.N. Pell. 2008. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems* 11: 726-739.
- Kishimoto S, Sugiura G. 1985. Charcoal as soil conditioner. In symposium on forest products research, International Achievement for the Future 5: 12-23.
- Krull, E., R. Kookana, R. Smernik, A. McBeath, S. Jahanshahi, J. McGowan, S. Donne and J. Lehmann. 2010. Agronomic and environmental implications of

- biochar sourcing, production and application. 3rd International biochar conference. IBI 2010. Progressing from Terra Preta de Indio to the whole world. International Biochar Initiative. 13-16 September 2010, Rio de Janeiro, Brazil.
- Laird, D.A., P. Fleming, D.D. Davis, R. Horton, B. Wang, D.L. Karlen. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158: 443-449. www.elsevier.com/locate/geoderma. Enero 2011.
- Laird, D.A., R. Brown, J. Amonette and J. Lehmann. 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*. 3:547-562. Wiley InterScience www.interscience.wiley.com. Abril 2010.
- Leach, M., Scoones, I. and Stirling, A. 2010. *Dynamic sustainabilities: Technology, environment, social justice*. Taylor & Francis. London: Earthscan LTD.
- Lehmann J., J.P. da Silva Jr., C. Steiner, T. Nehls, W. Zech, B. Glaser. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil* 249:343–357.
- Lehmann, J. and Rondon, M. 2006. Bio-char soil management on highly-weathered soils in the humid tropics. In: *Biological Approaches to Sustainable Soils Systems* (Uphoff, N.T. ed.) CRC Press/Taylor & Francis. Boca Raton. pp. 517-530.
- Lehmann, J. and S. Joseph, eds. 2009. *Biochar: Environmental Management*. Earthscan. United Kingdom and United States.
- Lehmann, J., 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5: 381-387.
- Lehmann, J., Woods, W., Teixeira, W., Steiner, C., WinlerPrins, L. and Rebellato, L. Editors. 2003. *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Origin, Properties, Management, 29-50. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Historical and socio-cultural origins of Amazonian dark earths.
- Liang B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B. O'Neill, J.O. Skjemstad, J. Thies, F.J. Luizao, J. Petersen, and G. Neves. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci Soc Am J*. 70: 1719–1730. <http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/SoilSciSocAmJ%2070,%201719-1730,%202006%20Liang.pdf>. Agosto 2009.
- Major, J. 2010. Guidelines on practical aspects of biochar application to field soil in various soil management systems. International Biochar Initiative. www.biochar-international.org. Febrero 2011.
- Major, J. 2011. Biochar for soil quality improvement, climate change mitigation and more. A literature review. <http://biochar-atlantic.org/assets/pdf/BiocharSoilFertility.pdf>.
- Martínez, H.E., E.J. Fuentes and H.E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Universidad de Chile. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1) (68-96) <http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>. Enero de 2010.
- Martínez, M.L., Torres, M.M., Guzmán, C.A. and Maestri, D.M. 2006. Preparation and characteristics of activated carbon from stones and walnut shells. *Industrial Crops and Products*. 23: 23-28.

- Mašek, O. and Brownsort, P. 2011. Biochar production. In: An assessment of the benefits and issues associated with the application of biochar to soil. Shackley, S. and Sohi, S. edit. UK Biochar Research Centre.
- Masera, O., Ordóñez, M. and Dirzo, R. 1997. Carbon emissions from Mexican Forests: Current Situation and long-term Scenarios. *Climate Change* 35: 265-295. <http://www.oikos.unam.mx/Bioenergia/images/PDF/CC/CC-Bosques/CARBON%20EMISSIONS%20FROM%20MEXICAN%20FOREST%20S.pdf> Octubre 2010.
- McClellan, T.; Deenik, J., Uehara, G., Antal, M. 2007. Effects of flashed carbonized macadamia nutshell charcoal on plant and soil. Department of tropical plants and soil science, Hawaii Natural Energy Institute. http://www.ctahr.hawaii.edu/deenikj/Downloads/Tai_Charcoal_CTAHR_Sym_2007.pdf. Febrero 2011.
- McHenry, M.P. 2009. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129: 1-7. http://ac.els-cdn.com/S0167880908002375/1-s2.0-S0167880908002375-main.pdf?_tid=a71e4236-f49d-11e2-b546-00000aacb360&acdnat=1374697052_0f711deaa596e6fffe40d911b1037c3e Mayo 2010.
- McLaughlin, H., Anderson, P. S., Shields, F. E. and Reed, T. B.. 2009. All biochars are not created equal, and how to tell them apart. North American biochar conference, Boulder, CO [http://www.biochar-international.org/sites/default/files/All-Biochars--Version2--Oct 2009.pdf](http://www.biochar-international.org/sites/default/files/All-Biochars--Version2--Oct%202009.pdf). Agosto 2009.
- Mills, E. 2012. Weighing the risks of climate change mitigation strategies. *Bulletin of the Atomic Scientists* 68(6) 67-78. <http://evanmills.lbl.gov/pubs/pdf/mills-comparative-climate-mitigation-risks-2012.pdf>. Diciembre 2012.
- Mullen, Ch., A. Boateng, K. Hicks, N. Goldberg and R. Moreau. 2010. Analysis and comparison of bio-oil produced by fast pyrolysis from three barley biomass/byproduct streams. *Energy Fuels*. 24:699-706.
- Neves, E.G., Petersen, J.B., Bartone, R.N., da Silva, C.A. 2003. Historical and socio-cultural origins of Amazonian Dark Earths In: Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI (eds) *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. The Netherlands.
- Novak, J.M., I. Lima, B. Xing, W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Srehrh, D.W. Watts, W.J. Busscher and H. Schomberg. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a Loamy Sand. *Annals of Environmental Science*. Vol 3:195-206.
- Novak, J.M., W.J. Busscher, D.W. Watts, D.A. Laird, M.A. Ahmedna, M.A.S. Niandou. 2010. Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switch grass to a typical kandiudult. *Geoderma* 154: 281-288.
- Orlando, P. 2012. Pesquisadores garipam a história contida na terra preta de índio. *Natureza*. <http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-de-indio.html> Octubre 2012.
- Pastor-Villegas, J., C. Valenzuela-Calahorra, A. Bernalte-Garcia and V. Gomez-Serrano. 1993. 'Characterization study of char and activated carbon prepared from raw and extracted rockrose', *Carbon* 31:1061–1069.

- Pratt, K. & Moran, D. 2010. Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential. *Biomass and Bioenergy*. 34 (8):1149-1158.
- Qiu, S., A.J. McComb, and R.W. Bell. 2008. Ratios of C, N and P in soil water direct microbial immobilization–mineralization and N availability in nutrient amended sandy soils in southwestern Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127: 93-99.
- Roberts, K., 2010. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic and climate change potential. *Environmental Science and Technology*. Vol. 44 (2): 827–833.
- Rondon, M.A., J. Lehmann, J. Ramírez and M. Hurtado. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils* 43(6): 699-708.
- Rouquerol, F., Rouquerol, I. and Sing, K. 1999. Adsorption by powders and porous solids. Academic Press. London, UK.
- Sadaka, S. and Eng, P. 2007. 2. Pyrolysis. Center for sustainable environmental technologies. Department of agricultural and biosystems engineering. Iowa State University. Nevada.
<http://bioweb.sungrant.org/NR/rdonlyres/57BCB4D0-1F59-4BC3-A4DD-4B72E9A3DA30/0/Pyrolysis.pdf>.
- Sánchez, S., Hernández, M., Ruz, F. 2011. Alternativas de manejo de la fertilidad del suelo en ecosistemas agropecuarios. *Pastos y Forrajes*. 34. www.redalyc.org/articulo.oa?id=269121519001> ISSN 0864-0394. Enero 2012.
- Schaczynski, J. 2010. Biochar and sustainable agriculture. pp. 1-12. In Holly Michels (Ed). National Sustainable Agriculture Information Service www.attra.ncar.org/attra-pub/biochr.html or www.attra.ncat.org/attra-pub/PDF/biochar.pdf.
- Schmidt, M.W.I. and A. G. Noack. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochem. Cycles*. 14, 777–794.
- Semarnat-CP. 2003. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria nacional 2001-2002. México.
- Sheil, D., I. Basuki, L. German, T. W. Kuyper, G. Limberg, R.K. Puri, B. Sellato, M. van Noordwijk and E. Wollenberg. 2012. Do anthropogenic dark earths occur in the interior of Borneo? Some initial observations from East Kalimantan. *Forests* 3: 207-229
- Shrestha, G., S.J. Traina and C.W. Swanston. 2010. Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review. *Sustainability* 2: 294-320. www.mdpi.com/journal/sustainability. Noviembre 2012.
- Skjemstad, J., D. Reicosky, A. Wilts and J. McGowan. 2002. Charcoal carbon U.S. agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1249–1255.
- Smith, N.J. H. 1980. Anthrosoles and human carrying capacity in Amazonia. *Annals of the Association of American Geographers* 70: 553-566.
- Sohi, S., Lopez-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. <http://www.csiro.au/files/files/poei.pdf>
- Sohi, S.P., E. Krull, E. Lopez-Capel and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, Volume 105: 47-82.

- Sombroek, W. 1966. Amazon soil: a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Centre for agricultural publications and documentation, Wageningen p. 292.
- Sombroek, W.G., F.O. Nachtergaele, A. Hebel. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*. 2. (7). The Royal Colloquium. 417-426.
- Srinivasarao, Ch., Gopinath, K.A., Venkatesh, G., Dubey, A.K., Harsha Wakudkar, Purakayastha, T.J., Pathak, H., Pramod Jha, Lakaria, B.L., Rajkhowa, D.J., Sandip Mandal, Jeyaraman, S., Venkateswarlu, B. and Sikka, A.K. 2013. Use of biochar for soil health management and greenhouse gas mitigation in India: Potential and constraints, Central Research Institute for Dryland Agriculture, Hyderabad, Andhra Pradesh. p.51.. <http://www.crida.in/NICRA%20pubs/NICRA%20Bulletin%201.pdf>. Octubre 2013.
- Steiner, C. 2010. Biochar in agricultural and forestry applications in: Biochar from agricultural and forestry residues – A complimentary use of “waste” biomass. pp. 1-14. In: Levine, J. (Ed). U.S.-focused biochar report: Assessment of biochar’s benefits for the United States of América.
- Steiner, C., K.C. Das, N. Melear and D. Lakely. 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *Journal of Environmental Quality* 39:1236-1242.
- Sukartono, W., H. Utomo, Z. Kusuma and W.H. Nugroho. 2011. Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. *Journal of Tropical Agriculture* 49 (1-2): 47-52.
- Tenenbaum, D.J. 2009. Biochar: Carbon mitigation from the ground up. *Environmental Health Perspectives* 117(2): A70-73.
- Thomas, C. 2010. The introduction of a carbon price and the use of agrichar in the sugarcane industry. *AFBM Journal*. 7-1. Charles Sturt University. <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/120871/2/Thomas.pdf>. Abril 2011.
- Tilman, D., R. Socolow, J.A. Foely, J. Hill, E. Larson, L. Lynd, S. Pacala, J. Reilly, T. Searchinger, C. Somerville, and R. Williams. 2009. Beneficial biofuels- The food, energy, and environment trilemma. *Science* 325: 270-271. <http://www.sciencemag.org/content/325/5938/270.full.pdf>. Julio de 2009.
- Titirici, M.M., A. Thomas and M. Antonietti. 2007. Back in the black: hydrothermal carbonization for plant material as an efficient chemical process to treat the CO₂ problem? *New J. Chem.*, 31: 787-789.
- Unger, R. and R. Killorn. 2011. Effect of the application of biochar on selected soil chemical properties, corn grain, and biomass yields in Iowa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42:2441–2451. <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00103624.2011.609253>. Marzo de 2013.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K.Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph and A. Cowie. 2010a. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plan Soil*. 327: 235-246. <ftp://ftp.dpvta.uniud.it/peressotti/Biochar/2010/NSW-Van%20Zwieten2010-Effects%20of%20biochar%20from%20slow%20pyrolysis%20of%20papermill%20waste%20on%20agronomic%20performance%20and%20soil%20fertility.pdf>. Febrero 2011.

- Van Zwieten, L; Kimber S., Downie A., Orr L., Walker T., Sinclair K., Morris, S. Joseph, S., Petty S., Rust J. and Chan K.Y. 2010b. Agro-economic valuation of biochar using field-derived data. 3rd International biochar conference. IBI 2010b. Progressing from Terra Preta de Indio to the whole world, 13-16 September 2010, Rio de Janeiro.
- Verheijen, F.G.A., Jeffery S., Bastos A.C., van der Velde M., and Dias I. 2009. Biochar application to soils - A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. EUR 24099 EN, Office for the official publications of the European Communities, Luxembourg, 149pp.
- Woods W.I. and McCann JM. 1999. The Anthropogenic origin and persistence of Amazonian Dark Earths. In: Caviedes C (ed) Yearbook 1999- Conference of Latin American geographers 25. Austin: University of Texas Press, pp 7-14
- Woods, W.I. 2004. Development of Anthrosol Research. In: Amazonian Dark Earths. Lehman, J., Kern, D.C., Glaser, B. and Woods, W.I. (Ed.). Kluwer Academic Publishers. USA.
- Woods, W.I. and Glaser B. 2004. Amazonian Dark Earths: Explorations in Space and Time. Heidelberg: Springer.
- Woolf, D., J.E. Amonette, F.A. Street-Perrott, J. Lehmann & S. Joseph. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nature Communications 1:56.
http://www.fluxfarm.com/uploads/3/1/6/8/3168871/sustainable_biochar_to_mitigate_global_climate_change.pdf. Septiembre de 2010.
- Yamoah, C. F., A. Bationo, B. Shapiro and S. Koala. 2002. Trend and stability of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel. Field Crops Research 75:53-62.

CAPITULO DOS

CARACTERIZACIÓN DE BIOCARBONES DE MAÍZ

CAPÍTULO DOS

CARACTERIZACIÓN DE BIOCARBONES DE MAÍZ

2.1 INTRODUCCIÓN

El interés actual del biocarbón se debe a que investigadores como Glaser *et al.* (2002) y Lehmann y Rondon (2006) han asegurado que produce mejoras en el suelo cuando es aplicado en las dosis adecuadas, pero sobre todo cuando el biocarbón tiene las propiedades específicas que impartan esa mejora. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de producción y calidades de materia prima empleada en su fabricación, pueden hacer que el biocarbón sea completamente ineficaz para retener nutrientes y disminuir el CO₂ liberado a la atmósfera, o susceptible a degradación por microorganismos (Lehmann, 2007).

Las características del biocarbón que dependen, en gran medida, como se señaló en la Introducción, de la naturaleza de la materia prima y de las condiciones del proceso de elaboración, y tienen que ser adecuadas para obtener un biocarbón con características deseables para aplicarlo al suelo (Downie *et al.*, 2009). Se conocen que hay diferencias en los biocarbones adicionados al suelo en cuanto a su comportamiento en el mismo. Dos biocarbones producidos, uno a partir de abono y otro de virutas de madera, podrían parecer iguales a simple vista; sin embargo, el primero tuvo mayor contenido de nutrientes que el segundo y, en cuanto a su estabilidad el segundo fue más estable por un periodo de tiempo mayor (Kookana *et al.*, 2011). En el proceso de elaboración, la temperatura es importante. Por ser un material orgánico, el biocarbón es poroso, pero el que es producido a 700°C tiene mucha mayor capacidad de adsorción y es más poroso que uno producido a 400°C (Kookana *et al.*, 2011). La temperatura más alta lo hace tener una mayor capacidad para adsorber sustancias tóxicas y rehabilitar ambientes contaminados (Krull, 2009), mientras que la estructura porosa le permite retener nutrientes y proveer una estructura en el suelo que estimula el desarrollo de hongos microscópicos importantes en la microbiología del suelo (Goodall, 2008).

Debido a que el biocarbón es el producto generado a partir de un amplio espectro de materiales y condiciones del proceso de obtención, ha sido difícil definir los

atributos de cada biocarbón y las características que definan aquéllas que describan su naturaleza. Aun cuando distintos biocarbones exhiben diferentes propiedades y los impactos que tienen pueden ser o no los mismos en una gama de sustratos, se torna difícil elegir los estándares que identifiquen las características importantes de todos los biocarbones. Es obvio que algunos de los criterios no podrán ser aplicados a todos ellos. Debiera pensarse en un número de características que sean comunes a todos los biocarbones para que sea aplicable universalmente (Reed, 2011). La estandarización de criterios con el fin de definir un comportamiento común dependiendo de tales características es indispensable.

Entre las propiedades que los biocarbones presentan está su recalcitrancia. Esta característica se refiere a cuán lenta es su degradación que puede ser de entre varios cientos a miles de años (Verheijen *et al.*, 2009), debida a la presencia de compuestos principalmente de carbono aromáticos que son difíciles de descomponer y que depende, en gran proporción, no sólo de la naturaleza de la biomasa usada y del proceso de pirólisis, sino también de las condiciones de producción de la materia prima en el campo, las propiedades del suelo y el clima (Lehmann *et al.*, 2006).

También dependen de esas variables la capacidad de adsorción de cationes y aniones, la porosidad, el área superficial y la baja densidad aparente, el pH que puede variar de ácido a básico, la distribución del tamaño de partícula, característica esta última que definirá, sobre todo, las medidas de manejo, transporte y aplicación en el campo y otras variables como sus reacciones en el suelo (Verheijen *et al.*, 2009). Dichas propiedades dependen de cuatro componentes generales: humedad, cenizas, materia volátil y materia residente (recalcitrante), que variarán en contenido y proporción según el biocarbón (Antal and Gronli, 2003; McLaughlin *et al.*, 2009).

Por otra parte, muchas características como el pH y la capacidad de intercambio catiónico varían conforme el biocarbón envejece, (Lehmann, 2007), debido a que las propiedades del biocarbón en el suelo son dinámicas por los cambios físico-químicos y biológicos que ocurren con el tiempo (Karve *et al.*, 2009).

Con el fin de asegurar que la naturaleza de los biocarbones sea la adecuada para que sean efectivos como mejoradores al ser adicionados al suelo, en el presente trabajo se tiene el objetivo de:

Caracterizar física y químicamente cuatro biocarbones derivados de rastrojo de maíz de diferente tamaño de partícula obtenidos en diferentes condiciones de pirólisis.

La hipótesis nula es: Las características físicas y químicas de los biocarbones son iguales y adecuadas para su uso como mejoradores de suelos.

2.2 REVISIÓN DE LITERATURA

La caracterización de biocarbones de diferentes materias primas y procesos de obtención ha sido realizada por muchos investigadores (Lehmann *et al.*, 2009; Brunn *et al.*, 2011; Angin, 2013). Sin embargo, muchas veces éstos no han consignado los datos suficientes para comparar los resultados, además las metodologías empleadas han sido diferentes y muchas fueron adecuadas de las de análisis de suelos (Baldock and Smernik, 2002; Hammes, 2006; Novak *et al.*, 2009). Tal enfoque para caracterizarlo no ha funcionado debido a que el biocarbón no se comporta como suelo y algunos procedimientos analíticos no pueden ser aplicados a él, como el pH, el cual se hace en el suelo con una relación 1:2.5 suelo:agua. Para ciertos biocarbones esta relación no funciona y debe emplarse una más amplia, como 1:10 por su gran capacidad de retención de humedad (Major *et al.*, 2010).

Con el fin de homogeneizar los criterios de caracterización de los biocarbones, donde se incluyese el concepto de calidad, se han realizado trabajos que implementaron tanto las metodologías convenientes para el análisis de las propiedades del biocarbón (International Biochar Initiative, IBI, 2013; Schmidt *et al.*, 2013; Biochar Quality Mandate, 2013), así como criterios de calidad para definir el tipo de biocarbón y su posible aplicación al suelo como mejorador para secuestrar carbono en el suelo (Biochar Quality Mandate, 2013; IBI, 2013). Las características que han sido definidas para ser evaluadas en los biocarbones y determinar la calidad de los mismos son: humedad, carbono orgánico, relación

hidrógeno:carbono (H:C), cenizas totales, nitrógeno total, pH, conductividad eléctrica, capacidad de encalado (si su pH es superior a 7), distribución del tamaño de partículas, en un primer grupo de características (IBI, 2013).

En estos parámetros, la humedad no es un elemento que defina el efecto de los biocarbonos como mejoradores de suelos. Sin embargo, es importante su determinación debido a que para la venta, transporte, manejo y aplicación al suelo debe considerarse cierto grado de humedecimiento para evitar una posible reacción con el aire, que según Blackwell *et al.* (2009) puede causar ignición espontánea. Tal peligro se evita con un ligero rociado de agua, aunque es necesario que no se aplique demasiado porque el transporte se haría más caro. McLaughlin *et al.* (2009) aseguraron que la cantidad de agua que un biocarbón puede retener es tres veces su peso.

El carbono orgánico, la relación hidrógeno:carbono (H:C) y las cenizas totales definen el comportamiento y estabilidad del biocarbón al ser aplicado al suelo.

Si se considera al biocarbón formado por la fracción de “carbono” y la de cenizas inorgánicas (no considerando humedad y materia volátil), pueden describirse sus propiedades de manera más sencilla. La fracción “carbono” incluye el hidrógeno, el oxígeno y otros elementos que están ligados a esta y es la más afectada por las condiciones de la reacción: tiempo de la reacción, temperatura, intervalo de calentamiento, que convierten la mayoría de los carbohidratos a estructuras aromáticas condensadas características del biocarbón, en diferente grado según los carbohidratos que estén presentes. La fracción de cenizas es más afectada por la naturaleza de la materia prima, mientras que las condiciones de la reacción tienen algún efecto en las propiedades de las cenizas y de la relación cenizas/carbono del producto, pero en general los constituyentes minerales que se encuentran en la biomasa se concentran en las cenizas (Brewer *et al.*, 2010).

Las cenizas que un biocarbón contiene dependen del contenido de cenizas de la materia prima. Esta fracción incluye elementos que constituyen los materiales orgánicos y que no fueron perdidos en el proceso pirolítico, tales como fósforo, potasio, calcio, magnesio. Estos elementos son importantes porque podrían hacerse disponibles para las plantas cuando el biocarbón es aplicado al suelo,

como lo afirmaron Lehmann *et al.* (2011). Estos nutrientes son constituyentes del consumo biológico y representan recursos importantes para la fertilidad del suelo.

El contenido de nitrógeno, pH, capacidad de encalado y conductividad eléctrica tendrían por un lado un efecto en la disponibilidad de este elemento y, por otro lado, el potencial de modificar el pH del suelo. Dichos cambios al usarlo como mejorador, influenciarán propiedades del suelo.

Las reacciones que el fósforo experimenta en la biomasa durante la pirólisis son relativamente simples, pues las formas químicas de este elemento son pocas, predominantemente inorgánicas (Hedley and McLaughlin, 2005) y tienden a concentrarse en la ceniza (Gaskin *et al.*, 2008; Hossain *et al.*, 2011). Si existe fósforo orgánico, los enlaces que lo unen a otros átomos pueden ser rotos por el tratamiento térmico e incrementarse las sales de fósforo soluble en ácido (De Luca *et al.*, 2009). Si la temperatura de la pirólisis es $> 700^{\circ}\text{C}$ probablemente el fósforo es volatilizado. Sin embargo, la mayoría de los biocarbones son procesados a temperaturas inferiores y se esperaría que el fósforo de la materia prima sea recuperado en el biocarbón (Hossain *et al.*, 2011). La recuperación de este nutriente define la necesidad de evaluar su disponibilidad en los biocarbones, así como definir su valor para la fertilidad del suelo; sin embargo, pocos estudios se han llevado a cabo para determinar ambas características y los que se han hecho usaron métodos originalmente desarrollados para suelos, como por ejemplo el propuesto por Olsen (Hossain *et al.*, 2011). Como se ha mencionado, los biocarbones son muy diferentes a los suelos y en este sentido las pruebas recomendadas para el análisis de fósforo en fertilizantes pueden ser más apropiadas. En un estudio conducido por Wang *et al.* (2012) concluyeron que el método del ácido fórmico al 2% había sido el más sensible como indicador de la disponibilidad de fósforo en los biocarbones.

La distribución del tamaño de partículas de los biocarbones está influenciada, principalmente, por la naturaleza de la materia prima de donde proviene y de las condiciones de pirólisis (Verheijen *et al.*, 2009). Según estos investigadores, la contracción y desgaste del material orgánico que ocurre en la pirólisis genera una gama de tamaños de partículas presente en el producto final. La proporción de diferentes tamaño de partículas de los biocarbones es útil para determinar la

aplicación específica de cada producto (Downie *et al.*, 2009), así como para la elección del método de aplicación, debido, sobre todo, a que los procesos que favorecen la fragmentación del biocarbón en partículas más pequeñas (como los ciclos de congelación y descongelación, lluvia, erosión eólica, bioturbación) puede hacerlo más susceptible a su degradación y transporte (Hammes and Schmidt, 2009). También es importante en el manejo, almacenamiento y transporte de los productos.

Sohi *et al.* (2009) discutieron la influencia del tipo de materia prima en la distribución del tamaño de partícula de los biocarbones. Estos investigadores definieron que los biocarbones generados de madera son más gruesos y derivados predominantemente del xilema, mientras que los derivados de residuos de cultivos (como arroz o maíz) y abonos, presentan estructura más fina y brillante. Generalmente al aumentar la temperatura (un intervalo de 450°C - 700°C) de la pirólisis, el tamaño de partículas de los biocarbones disminuyó tanto en arroz como maíz, debido a la reducción de la resistencia de la biomasa al desgaste.

En la segundo grupo de características están: el ensayo de inhibición de germinación, la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), la relación dioxina:furano, los bifenilos policlorinados (PCBs), la presencia de arsénico, cadmio, cromo, cobalto, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, selenio, zinc, boro, cloro y sodio (IBI, 2013). En este grupo se incluye la prueba de evasión de lombrices de tierra definida en una versión anterior (IBI, 2012).

Estos parámetros definen, en gran medida, la toxicidad que pudiera tener el biocarbón para las plantas y los organismos del suelo, pero además, la posibilidad de liberar hacia el suelo esas sustancias tóxicas (Han *et al.*, 2013)

En el tercer grupo de características se encuentran: el nitrógeno mineral (iones amonio y nitrato), fósforo y potasio total, fósforo extraíble, materia volátil, área superficial total y área superficial externa (IBI, 2013), los cuales sobre todo definirán la disponibilidad de nutrientes y las reacciones de adsorción en el suelo.

La materia volátil es definida por la American Society for Testing Materials (ASTM, 1954) como aquellos productos que son emitidos por un material en forma de gas

o vapor que pueden variar de acuerdo a la naturaleza del material, que no incluyen la humedad. Se considera como una medida de la susceptibilidad del biocarbón a descomponerse más y formar carbono biodisponible cuando es calentado. Esto es importante porque la relación entre la volatilidad de los compuestos del biocarbón y su recalcitrancia, aun no es clara en los suelos. Chan and Xu (2009) han observado que cuando el biocarbón contiene gran cantidad de carbonos aromáticos densos (que son recalcitrantes), y es aplicado al suelo hay una tendencia a tener bajo contenido de materia volátil, y viceversa, contenidos altos de materia volátil parecen causar inmovilización de nitrógeno en algunos estudios. Deenik *et al.* (2010) realizaron un estudio donde demostraron que altos contenidos de materia volátil (22.5%) en biocarbones de cáscaras de macadamia causó una disminución en el crecimiento de plantas de lechuga y maíz con las dosis altas, en experimentos de invernadero, al ser aplicados a razón de 0, 5, 10 y 20%, con y sin fertilizante nitrogenado. Cuando usaron un biocarbón con materia volátil de 6 %, se tuvieron efectos benéficos en maíz y aun más cuando se le adicionó fertilizante químico. Otra conclusión de Deenik *et al.* (2010) fue que el biocarbón con alto contenido de materia volátil disminuyó el nitrógeno en forma amoniacal y produjo un incremento significativo en la respiración en el suelo, comparado al suelo tratado con biocarbón con bajo contenido de materia volátil y el control (solo suelo).

Aun cuando existe mucho interés en evaluar la capacidad de intercambio catiónico (CIC), no se tiene una recomendación metodológica para hacerlo, de hecho no es una prueba analítica común y los procedimientos exactos varían de laboratorio a laboratorio. La mayoría de ellos han usado metodologías desarrolladas para suelos (McLaughlin *et al.*, 2009). Como muchos de los análisis químicos, la medida de esta variable involucra la mezcla del sólido con una solución extractante que requiere un tiempo para equilibrarse, con posterior separación de la fase líquida de la sólida, con subsecuente medición del cambio en la composición química del líquido (Christian, 1994). Sin embargo, tres propiedades que poseen los biocarbones hacen difícil analizarlos con este tipo de métodos. Primero, su baja densidad de los biocarbones crea un problema para separar el sólido del líquido, mientras que el suelo, en general es rico en minerales lo cual permite una separación de los sólidos en suspensión, efecto que

se incrementa por centrifugación o precipitación a que es sometido. Estas técnicas no han sido eficientes porque los biocarbones tienden a separarse en tres fracciones después de la centrifugación: una que flota, otra que se queda en el fondo y una tercera que permanece suspendida. Filtrar las muestras no constituye una alternativa ya que puede perderse gran parte del material. Segundo, el elevado pH de algunos biocarbones interfiere con el control de pH durante el análisis. Muchas propiedades químicas del suelo y el biocarbón como la CIC, son fuertemente dependientes del pH y los biocarbones que tienen un elevado contenido de cenizas, especialmente óxidos metálicos básicos de baja solubilidad, continuamente llevan el pH a un valor fuera del intervalo de análisis, incluso en métodos en que éste se amortigua, como por ejemplo, cuando se emplea acetato de amonio. Para obtener datos válidos de las propiedades dependientes del pH, estos biocarbones pueden necesitar ser enjuagados y neutralizar la alcalinidad que presentan antes del análisis. Finalmente, los biocarbones pueden contener elementos que no están en la forma química que puedan cuantificarse con el análisis y dar resultados erróneos (Brewer *et al.*, 2010).

Otro aspecto importante para realizar la prueba de la CIC en los biocarbones es ayudar a predecir el papel que desempeña esta característica de un biocarbón en el suelo. Hay estudios que documentan el desarrollo adicional de CIC en el suelo con el tiempo, factor que dependerá de las condiciones del suelo. Resulta probable que la medición de CIC de un biocarbón determine el nivel actual de esa propiedad en el tiempo de la medición, pero no indique el incremento de la CIC del suelo al cual fue agregado en un futuro (McLaughlin *et al.*, 2009).

Debido a que el biocarbón consiste de componentes altamente aromáticos químicamente estables (Schmidt and Noack, 2000) y el desarrollo de cargas negativas en la superficie por su oxidación en el suelo, se han propuesto diversos estudios para definir cómo aumenta la CIC del suelo (Cheng *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 2006). La estabilidad y oxidación del biocarbón depende en gran medida de su envejecimiento y de las condiciones edáficas; se ha observado que los procesos abióticos resultaron más importantes que los bióticos en su efecto sobre la oxidación del biocarbón y su aumento de CIC (Cheng *et al.*, 2006).

Para que un biocarbón sea seguro para aplicarlo al suelo debe demostrarse que no contiene compuestos tóxicos y moléculas orgánicas con niveles dañinos potencialmente como dioxinas, furanos, bifenilos policlorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, benceno, tolueno, xileno (Biochar Quality Mandate, 2013) para lo cual existen metodologías que requieren de equipos especializados o pruebas biológicas para prever un posible daño a organismos sensibles.

Existen criterios de evaluación sólo para carbono orgánico, materia volátil, metales y relación H:C en el biocarbón (IBI, 2012; Biochar Quality Mandate, 2013). No se han precisado intervalos o contenidos permisibles para otros parámetros, sino que está abierto a como se declaren tales contenidos en las diferentes investigaciones (IBI, 2013).

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Los biocarbones fueron preparados en la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO, A.C.) en Morelia, Mich., con un pirolizador artesanal que fue construido por ellos. Se trabajó con dos temperaturas: aproximadas a 300 y 650 °C, con rastrojo de maíz molido y tamizado a dos tamaños de partícula, menor y mayor de 4 mm. Después de tratarlos a esa temperatura por 3 a 3.5 horas fueron sacados del pirolizador, etiquetados y almacenados en bolsas de plástico. El material generado se trasladó al laboratorio donde se realizaron algunos análisis con base en las metodologías de IBI (2012).

Se evaluó la distribución de tamaño de partícula, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de humedad, cenizas y materia volátil, contenido de fósforo y potasio totales, fósforo soluble, carbono total, nitrógeno total, nitrógeno mineral, capacidad de intercambio catiónico, bases cambiables, así como densidad aparente, capacidad de retención de humedad, porosidad total, porosidad de aireación y porosidad de retención de agua. Las metodologías empleadas se muestran en el cuadro 2.1.

La determinación de distribución de tamaño de partículas se hizo mediante la separación de las partículas por medio de tamices, malla 40, 8 y 4. Las mediciones de pH y conductividad eléctrica se realizaron con una dilución biocarbón:agua 1:20 con un tiempo de agitación de 1 hora.

Cuadro 2.1 Metodologías de la Iniciativa Internacional de Biochar empleadas para la caracterización de muestras de biocarbones de rastrojo de maíz (IBI, 2012).

Parámetro	Metodología¹
pH	Rajkovich <i>et al.</i> (2011)
Conductividad Eléctrica	Rajkovich <i>et al.</i> (2011)
Humedad	ASTM D1762-84
Cenizas	ASTM D1762-84
Materia volátil	ASTM D1762-84
Distribución de tamaño de partícula	ASTM D2862-10
C total	Analizador de C total (Shimadzu)
N total	Analizador de N total (Elementar Cube)
Carbonato de calcio equivalente	Rayment & Higginson (1992)
N mineral (Nitratos y amonio)	Rayment and Higginson, 1992. Extracción con KCl 2M y destilación
Fósforo total	Enders and Lehmann (2012). Modificado de acenización seguida por ICP.
Fósforo extraíble	Rajan <i>et al.</i> , 1992; AOAC, 2005; Wang <i>et al.</i> , 2012
Densidad aparente	Columnas de Colman
Humedad a capacidad de campo	Olla de presión
Porosidad total	Método del embudo
Porosidad de aireación	Método del embudo
Porosidad de retención de humedad	Método del embudo

¹ Metodologías recopiladas por International Biochar Initiative (IBI), 2012total con un

La humedad, cenizas y materia volátil fueron medidas empleando una técnica gravimétrica a 105° C por 2 horas para la primera, a 750° C por 6 horas para la segunda y a 950°C por 6 minutos la tercera. El porcentaje de carbono fijado en el biocarbón se obtuvo por diferencia de la suma de humedad, ceniza y materia volátil del cien por ciento del peso inicial del mismo, que fue 1 g. El fósforo y

potasio totales fueron analizados por acenización de las muestras a 750°C y posterior disolución con HNO₃ y H₂O₂, seguidos por una determinación del digerido mediante ICP (espectrometría de plasma acoplado inductivamente), mientras que la determinación de fósforo extraíble fue hecha con ácido fórmico al 2% en una relación biocarbón:solución 1:100 y cuantificado por el procedimiento descrito por Kitson Mellon (Jackson, 1970). El carbono total fue determinado con un analizador automático TOC 5050 Shimadzu (Total Organic Carbon Analyzer) y el nitrógeno total con un Rapid N Cube instrumento de Elementar, que emplea oxígeno para gas de combustión y CO₂ como gas acarreador. Para realizar ambas evaluaciones las muestras de biocarbón se molieron en un mortero de ágata. También se determinó nitrógeno mineral (amonio y nitratos) en un extracto realizado con KCl 2M y posterior destilación con arrastre de vapor (Rayment y Higginson, 1992). La capacidad de intercambio catiónico se midió desplazando los cationes con acetato de amonio 1N neutral empleando un equipo Centurión y en el lixiviado se cuantificaron las bases cambiables mediante espectrometría de absorción atómica (EAA) y flamometría. Todas las determinaciones se hicieron por triplicado.

El pH y la conductividad eléctrica han sido usados como indicadores de la acidez e indirectamente como un estimador de la disponibilidad de nutrientes y la salinidad para estimar la presencia o ausencia de sales, así como posibles reacciones de estas con el suelo respectivamente cuando aplicado.

Además, se realizó un estudio de microscopía electrónica de barrido de los biocarbones, con un Scanning Electron Microscopy JSM-6390 JEOL y el uso de un detector de rayos X para microanálisis para la determinación de los elementos químicos existentes en ellos. Los biocarbones fueron molidos en un mortero de ágata para el análisis. La muestra se colocó en unos pequeños cilindros metálicos con un papel adhesivo y se puso en un *Fine coat ion sputter JFC-1100 Jcol* para ser recubiertos con oro y paladio a 1.2 kV y 10 mA, aproximadamente de 10 a 12 nm. Después fueron colocados en la cámara del microscopio al vacío.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis químicos de los cuatro biocarbones se muestran en el cuadro 2.2 y 2.3.

Cuadro 2.2 Características químicas de los biocarbones.

Clave	Fecha proceso	Mat. prima	Grosor	T	pH 30413	CaCO ₃ equiv.	CIC 230911 280813	Ceniza total	Materia volátil
			mm	°C		%	Cmol Kg ⁻¹	%	%
3562	Mayo 2011	Maíz	<4	300	9.5	6.88	12.7 19.4	49.80	1.29
10540	Ago-2011	Maíz	<4	300-650	10.4	10.2	17.1 19.9	37.65	1.60
10541	Ago-2011	Maíz	>4	300	9.9	9.66	16.6 28.3	11.40	2.32
3563	Mayo 2011	Maíz	>4	300-650	9.8	6.82	11.8 20.4	16.97	2.13
CA ¹					7.0	-	47.2	9.72	2.01

¹ CA = Carbón activado empleado como referencia

Cuadro 2.3. Contenido de carbono, nitrógeno, fósforo y potasio de los biocarbones.

Clave	C	C Fijado	% N	N mineral		P Soluble	P Total	K Total	C/N
				NH ₄ ⁺ ppm	NO ₃ ⁻ ppm				
	%	%		ppm	ppm	ppm	%	%	
3562	45	66.52	0.87	43.81	41.56	436	0.20	0.94	51.72
10540	56	57.19	0.87	43.81	71.98	432	0.23	1.33	64.37
10541	65	82.65	0.90	27.71	6.76	278	0.21	1.42	72.22
3563	64	77.11	0.92	20.56	32.66	297	0.20	1.35	69.57
CA ¹	100	72.58	-	59.89	28.05	17201	1.79	0.05	-

¹ CA = Carbón activado empleado como referencia

En el Cuadro 2.4 se presentan las características físicas de los biocarbones estudiados.

pH. El pH de los biocarbones fue fuertemente básico, y varió de 9.5 a 10.4, valores que coinciden con lo señalado por Shenbagavalli and Mahimairaja (2012) para un biocarbón de rastrojos de maíz (pH 9.68). Por su parte Lehmann *et al.* (2011) determinaron valores de 9.39 para biocarbones derivados también de

rastrojos de maíz, cuando la pirólisis se había hecho a temperatura de 350°C y pH 9.42 cuando ésta fue de 600°C, lo cual sugiere que pueden ser empleados en suelos ácidos por su efecto neutralizante de la acidez del suelo. Según Sing *et al.* (2006), generalmente si se aumenta la de temperatura de pirólisis se incrementa el pH, sin embargo, esto sucedió para los biocarbones cuyo tamaño de partícula fue <4mm, pero ocurrió lo contrario para aquellos cuyo tamaño fue > de 4mm.

Conductividad eléctrica. Los biocarbones de maíz presentaron valores de 1.86 a 3.75 dS.m⁻¹, más bajos que el presentado por Shenbagavalli and Mahimairaja (2012) para un biocarbón de rastrojo de maíz (4.18 dS m⁻¹), medido en un extracto biocarbón: agua en una relación 1:5.

Humedad. La humedad de los biocarbones fue baja, entre 3.39 y 3.79 %, que coincide con el 4% reportado por Brewer *et al.* (2010) para biocarbones de biomasa de maíz.

Cuadro 2.4. Características físicas de los biocarbones.

Clave	CE	Humedad	Densidad aparente	Porosidad Total	Porosidad de aireación	Porosidad de retención humedad
	dS.m ⁻¹	%	g cm ⁻³	%	%	%
3562	1.86	2.39	0.44	44.9	16	28.9
10540	3.75	3.56	0.38	56.3	19.9	36.4
10541	2.88	3.65	0.32	55.6	11.6	44.0
3563	2.84	3.79	0.39	43.1	11.1	32.0
CA	2.82	15.69	0.62	50.4	13.4	37.0

¹ CA = Carbón activado empleado como referencia

Distribución de tamaño de partículas. Este parámetro corresponde a las fracciones de diversos tamaños de las partículas de biocarbón que pasaron sucesivamente a través de tamices: 4760 µm, 2380 µm y 420 µm para determinar porcentajes <420 µm; 420-2380 µm; 2380-4760 µm y > 4760 µm. Los resultados obtenidos de los cuatro biocarbones se muestran en la figura 2.1.

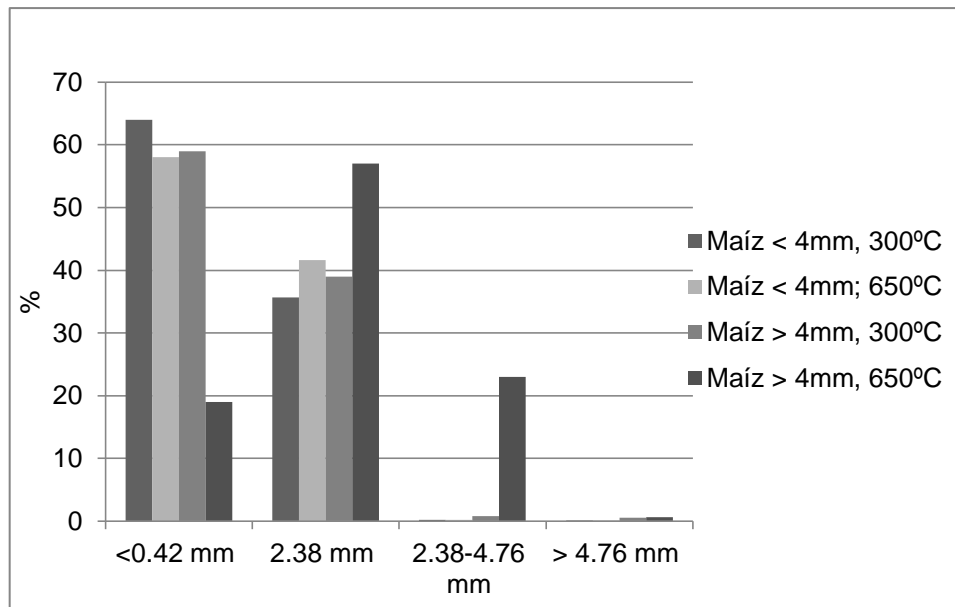


Figura 2.1. Porcentaje de partículas en diferentes intervalos de tamaño de los cuatro biocarbones de maíz (IBI, 2013).

En los materiales con tamaño original de partícula de biomasa antes de la pirólisis < 4 mm procesados a 300 y 650 °C y el de tamaño de partícula de biomasa original > 4mm pirolizado a 300°C predominaron los tamaños de partícula de biocarbón < 0.42mm y de 0.42-2.38 mm, mientras que para la biomasa de tamaño original de partícula de > 4 mm y pirólisis a 650°C predominaron las partículas de biocarbón 0.42-2.38 mm y 2.38-4.76 mm. Lo anterior permite inferir que cuando los materiales originales fueron gruesos, una alta temperatura de pirólisis produjo biocarbones con partículas más grandes, mientras que cuando la biomasa original fue fina, la temperatura no tuvo un mayor efecto sobre el tamaño de las partículas del biocarbón, siendo éstas mayoritariamente finas.

Materia volátil. Los contenidos de materia volátil fueron bajos en todos los biocarbones, entre 1.29 y 2.32%, lo que se considera muy adecuado para su aplicación al suelo; sin embargo, son muy diferentes a los definidos por Brewer *et al.* (2010) quienes consignaron un valor de 73% para un biocarbón de maíz, mientras que Lehmann *et al.* (2011), obtuvieron valores de 48.8 y 23.5% para dos biocarbones de maíz producidos a 350 y 600°C de pirólisis respectivamente. Por su parte, Uddin and Phuong (2012) determinaron 14 y 30% para dos biocarbones de arroz (cascarilla y rastrojo) respectivamente, dependiendo de la temperatura y

el intervalo de calentamiento durante la pirólisis. En este estudio, los biocarbones producidos con partículas < 4mm, la materia volátil aumentó ligeramente, mientras que para los de tamaño > 4mm disminuyó y aunque los valores se consideran muy bajos, según Zimmerman *et al.* (2011) cuando la materia volátil disminuye al aumentar la temperatura pirolítica significa una mayor recalcitrancia del biocarbón.

Cenizas. El contenido de cenizas varió de 11.4 a 49.8 % para los cuatro biocarbones, similares a los reportados por Brewer *et al.* (2010) para biocarbones de maíz (32.4%) y 11.4 y 16.7 medido por Lehmann *et al.* (2011) para biocarbones de esta misma materia prima con temperaturas de pirólisis de 350 y 600°C. Peterson *et al.* (2013), por su parte, determinaron 39.6 % de cenizas para un biocarbón de rastrojos de maíz, pero Brendová *et al.* (2012) reportaron 27.28 y 29.73 % de cenizas también para biocarbón de maíz por pirólisis a 500 y 500°C respectivamente. Como puede observarse los porcentajes de cenizas reportados varían ampliamente, lo que se puede atribuir a diferencias en la calidad de las materias primas o a problemas metodológicos.

Otros biocarbones producidos con diferentes tipos de biomasa han sido analizados. El contenido de cenizas de un biocarbón de pajilla de arroz fue 29.45% (Han *et al.*, 2013), en tanto que Uddin and Phuong (2012) encontraron 33% y 41% en dos biocarbones, uno de cascarilla de arroz y otro de paja de arroz. También biocarbones de diferentes orígenes: 4 especies de humedales, cáscara de pomelo y cáscara de piña, estiércol de lechón y cerda, presentaron concentraciones medias de cenizas y se incrementaron de 14% a 28% cuando se incrementó la temperatura de pirólisis de 300°C a 500°C (Dai *et al.*, 2013). McLaughlin *et al.* (2009) mencionaron que cuando el valor de cenizas era superior al 10% se debe considerar que el biocarbón posee poder encalante y puede ser benéfico en suelos ácidos pero no en suelos básicos. Demirbas (2004), afirmó que residuos de cultivos como materia prima producen biocarbones con alto contenido de cenizas.

Con respecto a la temperatura de pirólisis, fue mayor el contenido de cenizas en el biocarbón con materia prima de tamaño < 4mm, como también lo mencionan Uddin and Phuong (2012), quienes aseguraron que con una mayor temperatura de pirólisis aumentaba el contenido de cenizas. Sin embargo, en el presente

experimento esto no resultó así en los biocarbones cuyo tamaño de partícula original fue > de 4 mm, que tuvieron el mismo contenido de cenizas a diferentes temperaturas.

Contenido de carbono. Los cuatro biocarbones tuvieron de 45 a 65%, lo que coincide con resultados presentados por Peterson *et al.* (2013). Estos autores registraron un valor de 45.14% para un biocarbón de maíz, así como con Brendová *et al.* (2012), obtuvieron valores de 54.97 % (500°C) y 44.19% (550°C) en dos biocarbones de esta misma materia prima. Por su parte Brewer *et al.* (2010), obtuvieron 41 % para un biocarbón de maíz. Nuestros biocarbones difieren en este aspecto con lo reportado por Lehmann *et al.* (2011), que mostraron valores de 60.4 y 70.6% para dos biocarbones de rastrojos de maíz con una temperatura de pirólisis de 350 y 600°C, respectivamente, así como con Shenbagavalli y Mahimairaja (2012) que manejaron un 83 % de carbono. Las diferencias mostradas pueden atribuirse a la manera como se realizó la pirólisis. Los biocarbones 3563 y 10541 son clasificados por su porcentaje de carbono, según IBI (2012), como clase 1, mientras que 3562 y 10540 como clase 2.

Algunos estudios (Demirbas 2004; Uchimya *et al.*, 2011) han revelado que el contenido de C se incrementa con el aumento de la temperatura de pirólisis. Esto se cumplió para los biocarbones que tuvieron un tamaño de partícula de biomasa original <4mm, pero no así para los de >4mm, los cuales tuvieron valores semejantes con las dos temperaturas (300 y 650°C). Lo que aconteció con estos últimos coincidió con lo indicado por Brendová *et al.* (2012), quienes explicaron este resultado como consecuencia de una condición imperfecta de pirólisis y que el limitar la presencia de oxígeno no era suficiente.

Carbono fijado. El porcentaje de C fijado fue alto, de 57.19 a 82.65%, que coincide con los valores de Lehmann *et al.* (2011). Para biocarbones de maíz estos autores encontraron valores de de 39.8 y 59.8 % que fueron producidos por pirólisis a 350 y 600°C, respectivamente, Brewer *et al.* (2010), contrariamente obtuvieron un porcentaje de C fijado de 10% para un biocarbón de maíz.

Zimmerman *et al.* (2011) proponen la relación de la materia volátil/(materia volátil + carbono fijado), como parámetro para predecir la estabilidad de los biocarbones.

Esta relación en todos los productos analizados fue muy baja (0.02-0.03), lo que indicaría que son materiales bastante estables.

Nitrógeno total. El porcentaje de nitrógeno total varió entre 0.87 a 0.92 % en los cuatro biocarbones de maíz estudiados, valores que coinciden con los mencionados (0.92%) por Shenbagavalli and Mahimairaja (2012) en un biocarbón de maíz. Estos porcentajes fueron ligeramente más altos que aquellos obtenidos por Brewer *et al.* (2010) (0.7%) y por Peterson *et al.* (2013) (0.44%). En biocarbones generados a alta temperatura, Brendová *et al.* (2012) reportaron porcentajes de nitrógeno de hasta 1.95% para un biocarbón producido a 500°C y 1.79% para otro obtenido a 550°C.

Nitrógeno mineral. El nitrógeno amoniacal de los cuatro biocarbones estudiados varió de 20.6 a 43.8 ppm, mientras que el nitrógeno nítrico de 6.8 a 72.0 ppm, éste último fue muy variable. Los biocarbones con los menores contenidos fueron los derivados de biomasa de tamaño de partícula > 4mm.

Relación C:N. Esta relación presentó valores entre 51.7 y 72.2 para los cuatro biocarbones de maíz. Éstos coinciden con los obtenidos por Lehmann *et al.* (2011) para biocarbones de la misma materia prima (51 y 66) generados a temperaturas de pirólisis de 350 y 600°C respectivamente, pero más bajos que los mencionados por Shenbagavalli and Mahimairaja (2012) (90.2) y más altos (28.2 y 24.7) que los obtenidos por Brendová *et al.* (2012) para biocarbones producidos con maíz a 500°C y a 550°C, respectivamente.

Fósforo total. Los contenidos de este elemento variaron entre 0.20 y 0.23%, similares a los obtenidos por Lehmann *et al.* (2011) (0.19 y 0.21 %) para dos biocarbones de maíz procesados a 350 y 600°C, respectivamente, pero ligeramente más bajos que el obtenido por Shenbagavalli and Mahimairaja (2012) (0.29%) y Brewer (2010) (0.48%) para dos biocarbones de maíz, uno procesado a 500°C y otro a 550°C. Es entendible que la cantidad de fósforo en la materia prima influya en este resultado.

Fósforo extraíble. El fósforo extraíble con ácido fórmico fue de 278 a 436 mg kg⁻¹, valor que es alto si se consideran los contenidos de fósforo extraíble en suelos, con las distintas metodologías generalmente usadas en los laboratorios y

definidos en un nivel alto. Castellanos *et al.* (2000) y Wang *et al.* (2013), consideraron que los biocarbones con alto contenido de fósforo podrían ser usados como un fertilizante de liberación lenta y que es necesario determinar el fósforo que podría estar disponible en los biocarbones antes de su aplicación al suelo para que la dosis, frecuencia y tiempo de aplicación sean correctamente establecidas.

Potasio total. El contenido de este nutriente en los biocarbones fue de 0.94 a 1.32 %, más elevado que lo indicado por Shenbagavalli and Mahimairaja (2012) (0.67 %) y menor que el consignado por Brewer *et al.* (2010) (3.34%).

Densidad aparente. La densidad aparente de los biocarbones estudiados se ubicó en el rango 0.32 a 0.44 g cm⁻¹, valores parecidos a los obtenidos para otros biocarbones, como el estudiado por Shenbagavalli and Mahimairaja (2012) (0.45 g cm⁻¹), o lo señalado por Brewer (2010) como el intervalo de densidad de diferentes biocarbones dependiendo de la materia prima y el proceso de obtención (0.2 – 0.5 g cm⁻¹). Holmes *et al.* (2010) obtuvieron la densidad aparente de biocarbones derivados de podas de plantas de kiwi (*Actinidia chinensis*) de 0.38-0.43 g cm⁻¹. El carbón activado usado como control, presentó un valor de 0.62 g cm⁻³. William and Arnott (2010), determinaron un valor de 0.35 g cm⁻³ para un biocarbón derivado de residuos de madera dura.

Retención de humedad. La retención de humedad fue alta, con valores en el punto de saturación de 245 a 501 %, (Cuadro 2.5), donde se presentan la retención de humedad a 0, 10132.5, 50662.5, 101325 Pa.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC). La capacidad de intercambio catiónico de los biocarbones se ubicó en un intervalo entre 19 y 29 cmol kg⁻¹ valor que se incrementó con el envejecimiento de ellos, ya que se determinó la CIC dos veces, en 2011 y 2013, aumentando de 2 a 18 cmol kg⁻¹ en esos dos años, lo que concuerda con lo indicado por Kookana *et al.* (2011), quienes señalaron que con el envejecimiento del biocarbón aumenta este valor. Shenbagavalli y Mahimairaja (2012), obtuvieron un valor de 6.5 cmol kg⁻¹ para un biocarbón derivado también de rastrojos de maíz, que es mucho más bajo que los obtenidos en el presente trabajo. Lehmann *et al.* (2011), midieron valores de 41.93 y 25.21 cmol kg⁻¹ para

Cuadro 2.5. Porcentajes de humedad retenida a diferentes tensiones.

Biocarbón	Tensión (Pa)			
	0	10132.5	50662.5	101325
	PORCENTAJES DE HUMEDAD			
3562	245.1	197.1	139.6	110.1
10540	501.4	402.2	256.8	222.8
10541	454.0	398.1	295.5	242.5
3563	318.2	255.3	150.4	135.4
CA	261.8	235.0	197.0	175.7

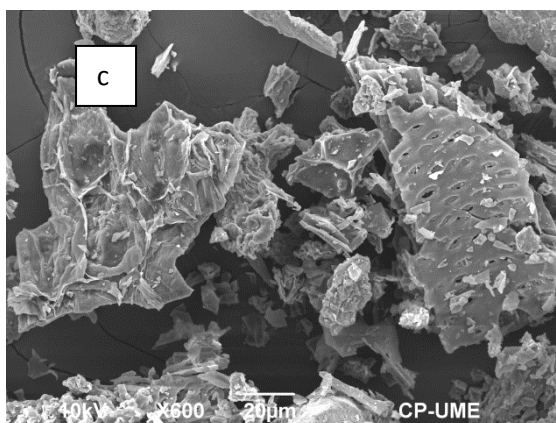
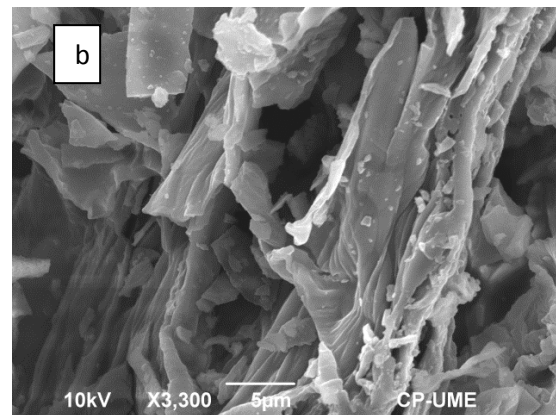
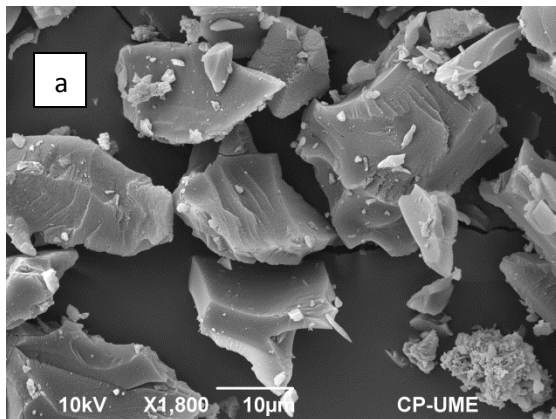
biocarbones de la misma materia prima procesados a 350 y 600°C respectivamente. En consecuencia, se puede concluir que los biocarbones analizados en el presente estudio generados de paja de maíz con tamaño de partícula de > 4mm, coincide con los resultados previos. También puede observarse que los biocarbones cuya materia prima original de diámetro < 4mm, la CIC aumentó con la temperatura, lo que no sucedió a los biocarbones de biomasa > de 4mm. En cuanto al efecto de la temperatura de pirólisis para los biocarbones cuya biomasa original tenía un diámetro < 4mm, sí tuvo un aumento como lo demostraron Gaskin *et al.* (2008), pero fue contrario para los biocarbones de tamaño de partícula > 4mm pues, en ese caso la CIC disminuyó.

Contenido de carbonato de calcio equivalente. Los valores de este parámetro para los cuatro biocarbones variaron de 6.82 a 10.20, los cuales son altos, lo cual indica que tienen capacidad para servir como material de encalado, pero más bajos que los señalados por van Zwieten *et al.* (2007) quienes trabajaron con dos biocarbones de 29 y 33 % de carbonato de calcio equivalente.

Porosidad. La porosidad de los biocarbones fue medida como porosidad total, de retención de humedad y de aireación. Los valores de la porosidad total variaron de 43.1 a 56.3 en los cuatro biocarbones, pero es notorio que para los biocarbones derivados de biomasa < 4mm, ésta aumentó con el incremento de temperatura, no así para los biocarbones de biomasa > 4mm que disminuyó al

aumentar la temperatura. Este fenómeno se reflejó tanto en la porosidad de aireación como en la de retención de humedad, ésta última con valores más altos que definen una mayor capacidad de contener agua que aire. Además se observó la porosidad a través de microscopía electrónica de barrido (Figura 2), donde se notan poros cilíndricos debidos a la estructura celular vascular de la biomasa original, como lo menciona Lee *et al.* (2013) en un biocarbón derivado de *Miscanthus giganteus* a través de pirólisis a 500°C.

Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). Los biocarbones presentaron gran porosidad en algunas partes y en otras no fue observada (Figura 2.2). Además pudieron notarse estructuras de la materia original de maíz, pues se encontraron vasos conductores, fitolitos compuestos de sílice, estomas y esporas, (Figura 2.3).



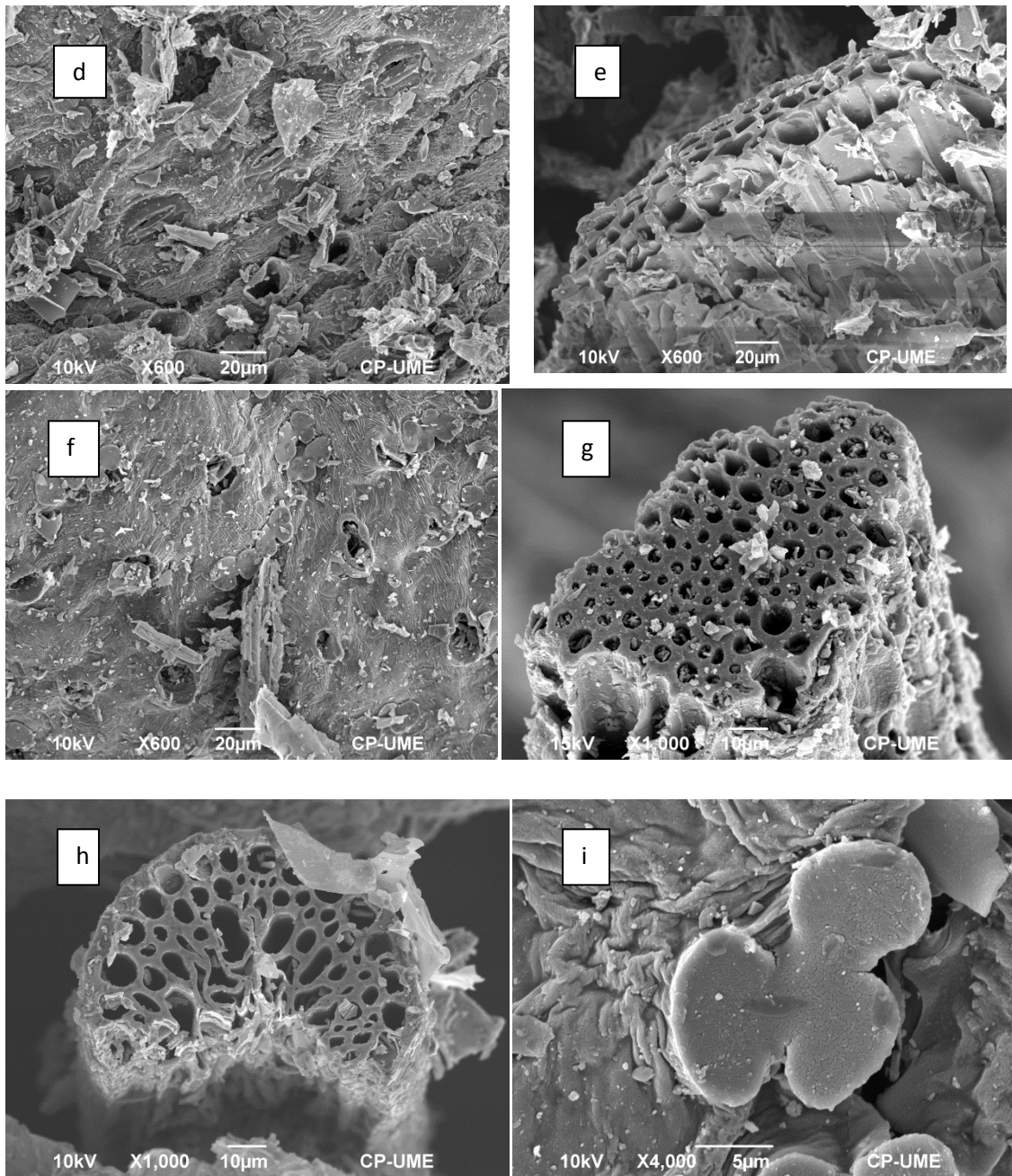


Figura 2.2. Vistas microscópicas con SEM de los biocarbones. a) Carbón activado, b) y c), biocarbón < 4mm y T de 300°C, d) y e) biocarbón de BM < 4mm y T de 650°C, f) y g) biocarbón > 4mm y T de 300°C, h) e i) biocarbón > 4mm y T de 650°C. Se observan partes con mucha porosidad y otras sin ella, a excepción del carbón activado que no se observó porosidad. En la foto d) aparecen estomas y en la i) fitolitos de silicio.

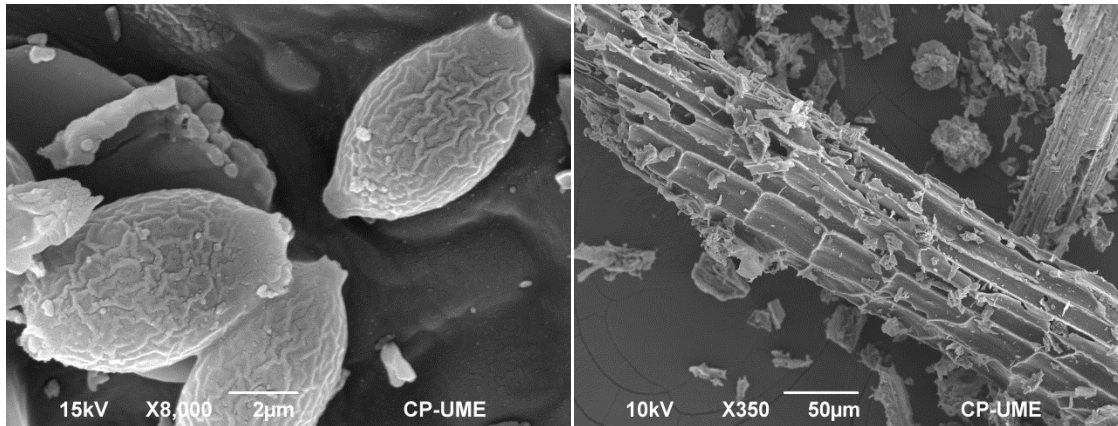


Figura 2.3. A la izquierda se observan esporas y a la derecha estructuras del material original.

Los estudios de composición química mostraron que todos los biocarbones tuvieron carbono y oxígeno, el carbón activado también presentó fósforo, calcio y sodio. Los cuatro biocarbones de maíz además presentaron silicio, potasio, magnesio y aluminio. En particular en los biocarbones con biomasa > 4mm y T de 300 y 650°C también se detectó una pequeña cantidad de cobre. La Figura 2.4 muestra un reporte de contenidos de elementos de un biocarbón.

Biocarbón de BM <4mm y T de 650°C.
6/20/2012 3:32:45PM

Spectrum processing:

Peaks possibly omitted: 2.145, 2.837 keV

Processing option: All elements analyzed
(Normalised)

Number of iterations = 2

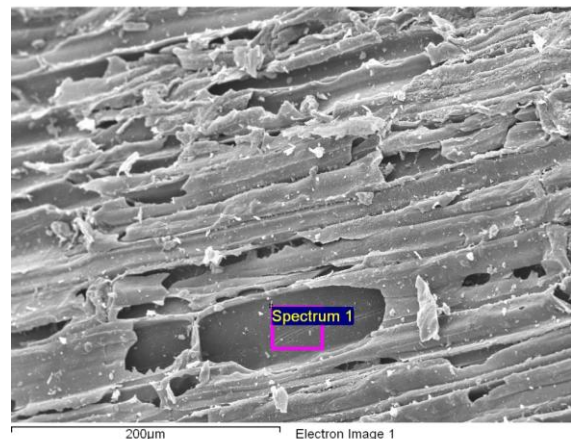
Standard:

C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM

K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM



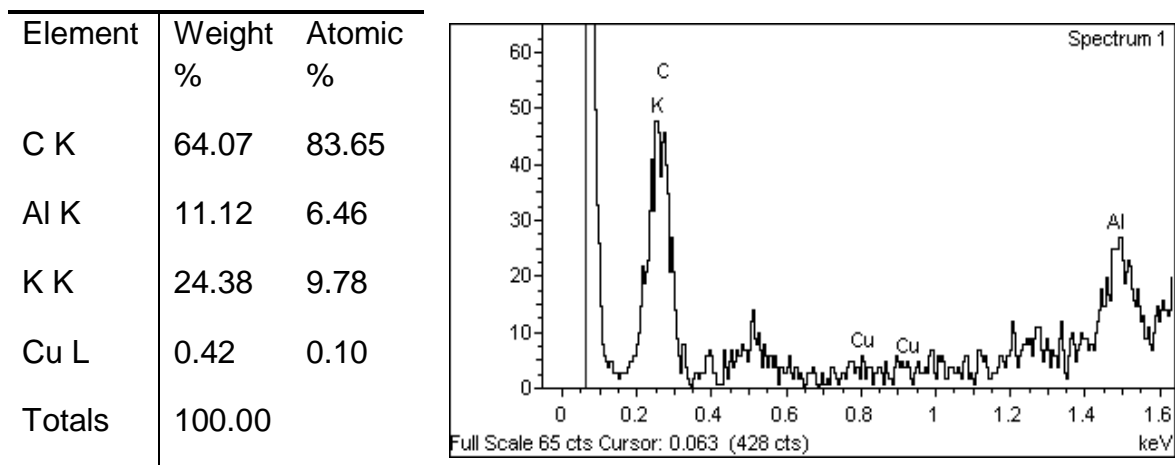


Figura 2.4. Análisis elemental por microscopía electrónica de barrido, donde se observa contenidos de carbono, potasio y aluminio.

2.5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que los biocarbones derivados de biomasa de rastrojo de maíz pueden ser usados como mejoradores de suelos ácidos, tanto por su pH básico, contenido de carbonato de calcio y por su baja materia volátil. Aun cuando los cuatro biocarbones provienen de la misma materia prima, se encontraron diferencias marcadas en algunos parámetros como carbono total, carbono fijado, fósforo soluble, nitrógeno mineral, densidad aparente, porosidad de aireación y porosidad de retención de humedad, lo que sugiere que más que la naturaleza de la materia prima, fue el tamaño de partícula de la misma y la temperatura del proceso de elaboración. Asimismo se encontraron diferencias en la CIC y en el contenido de carbonato de calcio. Sin embargo, hay que precisar que como fue un procedimiento artesanal, no todas las variables fueron exactamente controladas e iguales. Asimismo por su contenido bajo de materia volátil y alto de carbono fijado, se espera que sean bastante estables al ser adicionados al suelo.

Por sus diferencias en cuanto a tamaño de partícula, es necesario realizar un manejo, transporte y aplicación al suelo de acuerdo a su tamaño, además considerar para su aplicación el contenido importante de nutrientes, sobre todo fósforo, potasio y calcio.

2.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angin, D. 2013. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresource Technology*. 128, 593-597.
- Antal Jr. M.J. and M. Grönli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 42(8): 1619-1640.
- American Society for Testing Materials. 2001. Standard test method for chemical analysis for wood charcoal. Designation: D1762 – 84. USA
- Baldock, J.A., and R.J. Smernik. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red Pine) wood. *Org. Geochem.* 33: 1093-1109.
- Biochar Quality Mandate. 2013. V.1.0. University of Edinburgh, UK Biochar research centre, British biochar foundation and Esmée Fairbairn Foundation.
- Blackwell, P., G. Riethmuller and M. Collins. 2009. Biochar application to soil. In 'Biochar for Environmental Management : Science and Technology.' (Eds JD Lehmann and S Joseph) pp. 207-226. Earthscan, London.
- Brendová, K., Tlustos, P., Száková, J. and Habart, J. 2012. Biochar properties from different materials of plant origin. *Eur. Chem. Bull.* 1 (12): 535-539.
- Brewer, C.E., Schmidt-Rohr, K., Satrio, J.A. and Brown, R.C. 2009. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. Wiley InterScience. www.interscience.wiley.com. Marzo 2010.
- Brewer, C. 2010. Biochar characterization and engineering. ISTC Biochar symposium. Iowa State University. USA.
- Brunn, E.W. 2011. Application of fast pyrolysis biochar to a loamy soil. RIS-DTN. National laboratory for sustainable energy. Denmark
- Castellanos, J.Z., Uvalle-Bueno, J.X. y Aguilar-Santalises, A. 2000. Memoria del curso sobre interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, olantas y ECP (savia) con la finalidad de deteminar los programas de fertilización. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. México.
- Chan, K.Y., Xu, Z., 2009. Biochar: Nutrient properties and their enhancement. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Lehmann, J. & Joseph, S. ed.), Earthscan. London, U.K.
- Christian, G.D. 1994. *Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons, INC. USA.
- Dai, Z., Meng, J., Muhammad, N., Liu, X., Wang, H., He, Y., Brookes, P.C. and Xu, J. 2013. The potential feasibility for soil improvement, based on the properties of biochars pyrolysed from different feedstocks. *J. Soil Sediments*. 13: 989-1000.
- De Luca, T.H., McKenzie, M.D. and Gundale, M.J. 2009. Biochar effects on soil nutrient transformations. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. (J. Lehmann and S. Joseph, eds.) Earthscan. London, UK.
- Deenik, J., McClellan, T., Uehara, G., Antal, M. and Campbell, S. 2010. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations. *Soil Science Society of America Journal*. 74 (4): 1259-1270
- Downie, A., Crosky, A., Munroe, P., 2009. Physical properties of biochar. In: *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (Eds. Lehmann, J. & Joseph, S.), Earthscan. London, UK.

- Enders, A. & Lehmann, J. 2012. Comparison of wet-digestion and dry-ashing methods for total elemental analysis of biochar, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(7): 1042-1052.
- Gaskin, J.W., Steiner, C., Harris, K., Das, K.C. and Bibens, B. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *T. Asabe* 51: 2061-2069.
- Glaser, B., J. Lehmann and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review. *Biol. Fert. Soils*. 35: 219-230.
- Goodall, C. 2008. Ten technologies to save the planet. Profile Books. London, UK.
- Hammes, K., R.J. Smernik, J.O. Skjemstad, A. Herzog, U.F. Vogt, and M.W.I. Scminidt. 2006. Synthesis and characterization of laboratory-charred grass straw (*Oryza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. *Org. Chem*. 37: 1629-1633.
- Hammes, K., Smernik, R.J., Skjemstad, J.O. and Schmidt. 2008. Characterisation and evaluation of reference materials for black carbon analysis using elemental composition, colour, BET surface area and ¹³C NMR spectroscopy. *Applied Geochemistry*. 23: 2112-2122.
- Han, X., Liang, C., Li, T., Wang, K., Huang, H. and Yang, X. 2013. Simultaneous removal of cadmium and sulfamethoxazole from aqueous solution by rice straw biochar. *J. of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology)*. www.zju.edu.cn/jzus; www.springerlink.com. Agosto 2013.
- Hedley, M. and McLaughlin, M. 2005. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. In *Phosphorus: agriculture and the environment*. (J.T. Sims and A.N. Sharpley, eds.) American Society of Agronomy. Madison, USA.
- Holmes, A., Rahman, M.H., Saunders, S.J. and Mowat, A. 2010. Biochar generated from kiwifruit vine prunings: scope and characterization. In: *Biochar workshop. Opportunities for New Zealand stakeholders*. New Zealand.
- Hossain, M.K., Strezov, V., Chan, K.Y., Ziolkowski, A. and Nelson, P.F. 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar, *J. Environ. Manage*. 92:223-228.
- International Biochar Initiative. 2012. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. www.biochar-international.org. Mayo de 2012.
- International Biochar Initiative. 2013. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>. Abril 2013.
- Jackson, M.L. 1970. *Análisis Químico de Suelos*. Ediciones Omega. España.
- Karve, P., Prabhune, R., Shackley, S., Carter, S., Anderson, P., Sohi, S., Cross A., Haszeldine, S., Haefele, S., Knowles, T., Field, J. and Tanger, P. 2009. Biochar for carbon reduction, sustainable agriculture and soil management (BIOCHARM). Final report for APN Project. ARCP 2009-12NSY. https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDsQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.apn-gcr.org%2Fresources%2Farchive%2Ffiles%2F1d461f5fc45b0711342ef8c2b1e1030c.pdf&ei=KjSzUoGMMOSC2QXLjYH4Bq&usq=AFQjCNFAZN8zPJQIXje0bHWISOheKm-l_g&bvm=bv.58187178,d.b2I. Diciembre 2010.

- Kookana, R. S.; Sarmah, A. K.; Van Zwieten, L.; Krull, E.; Singh, B. 2011. Chapter three - biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. In *Advances in Agronomy*, Donald, L. S., Ed. Academic Press. 112: 103-143. USA.
- Krull, E.S., J.A. Baldock, J.O. Skjemstad, and R.J. Smernik. 2009. Characteristics of biochar: Organochemical properties. pp. 53-65. In: Lehmann and S. Joseph (eds.) *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, UK.
- Krull, E. S. (2009), Biochar fact sheet. CSIRO. Land and Water. Australia.
- Laird, D. A.; Fleming, P.; Davis, D. D.; Horton, R.; Wang, B.; Karlen, D. L. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158, (3-4), 443-449.
- Lee, Y., Byul, E.P.R., Ryu, C., Park, Y.K., Hung, J.H and Hyun, S. 2013. Characteristics of biochar produced from slow pyrolysis of *Geodae-Uksae* 1. *Bioresource Technology*. 130: 345-350.
- Lehmann, J. and Rondon, M. 2006. Bio-char soil management on highly-weathered soils in the humid tropics. In: *Biological Approaches to Sustainable Soils Systems* (Uphoff, N.T. ed.) CRC Press/Taylor & Francis. Boca Raton. pp. 517-530.
- Lehmann, J., 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5: 381-387.
- Lehmann, J., Rilling, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C. and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology & Biochemistry*. 43: 1812-1836.
- Liang B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B. O'Neill, J.O. Skjemstad, J. Thies, F.J. Luizao, J. Petersen, and G. Neves. 2006. Black carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Sci Soc Am J*. 70: 1719–1730.
<http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/SoilSciSocAmJ%2070,%201719-1730,%202006%20Liang.pdf>. August 2009
- Major, J. 2010. Guidelines on practical aspects of biochar application to field soil in various soil management systems. International Biochar Initiative. www.biochar-international.org. Febrero 2011.
- McLaughlin, H., Anderson, P. S., Shields, F. E. and Reed, T. B.. 2009. All biochars are not created equal, and how to tell them apart. North american biochar conference, Boulder, CO <http://www.biochar-international.org/sites/default/files/All-Biochars--Version2--Oct 2009.pdf>.
- Novak, J.M., W.J. Busscher, D.L. Laird, M. Ahmedna, D.W. Watts, and M.A.S. Niandou. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Sci*. 174: 105-112.
- Peterson, S.C., Appell, M., Jackson, M.A. and Boateng, A.A. 2013. Comparing corn stover and switchgrass biochar: characterization and sorption properties. *J. of Agric. Sci*. 5 (1): 1-8.
- Rayment, G.E. and Higginson, F.R. 1992. *Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods*. Inkata Press, Port Melbourne. In: Rayment, G.E. and Lyons, D.J. 2011. *Soil Chemical Methods – Australasia*. CSIRO. Australia.

- Reed, D. 2011. Biochar characterization standards are essential to the success of the biochar industry. International Biochar Initiative. http://www.biochar-international.org/standards_are_essential. Agosto 2011.
- Schmidt, M.W.I. and A. G. Noack. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochem. Cycles*. 14, 777–794.
- Schmidt, H.P., Abive, S., Kammann, C., Glaser, B., Bucheli, T. and Leifeld, J. 2013. Guidelines european biochar certificate for a sustainable production of biochar. European Biochar Foundation.
- Shackley, S., Ibarrola, R., Hammond, J., Hopkins, D., Manning, D., Hough, R., Dunn, N., Davis, M., Collinson, M., Donaldson, F., McGrath, S., Sohi, S., McLaren, D., Graham, M and Masek, O. 2013. Biochar quality mandate (BKM) v. 1.0. Esmée Fairbairn Foundation. UK.
- Shenbagavalli, S. and Mahimairaja, S. 2012. Production and characterization of biochar from different biological wastes. *International J. of Plant, Animal and Enviromental Sciences*. 2: 192-201.
- Singh B., Singh B.P., Cowie, A.L. 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Soil Research* 48: 516–525.
- 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. <http://www.csiro.au/files/files/poei.pdf>
And Env. Sciences. 2(1):197-201.
http://www.ijpaes.com/admin/php/uploads/145_pdf.pdf. Marzo 2013.
- Uchimiya, M., Chang, S. and Klasson, K.T. 2011. Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups. *Journal of Hazordous Materials*. 190: 432-441
- Uddin, A. and Phuong H.T. 2012. Development of technologies for the utilization of agricultural and forestry wastes: Preparation of biochar from rice residues. Okayama University. Departament of Materials and Energy Science Japan. http://ambiente.okayama-u.ac.jp/management/up_load_files/gakkan/2012_en/2012_en_3-1.pdf.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, A. Downie, A., S. Joseph, K.Y., A. Cowie., R. Wainberg and S. Morris. 2007. Paper mill agrichar: Benefits to soil health and plan production. International Agrichar Initiative (IAI) 2007 conference. Terriga, Australia.
- Van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K.; Downie, A.; Rust, J.; Joseph, S.; Cowie, A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327: 235-246.
- 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 and functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 149pp.
- Wang, T., Camps-Arbestain, M. and Bishop, P. 2012. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and Soil*. 357:173-187.
- Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M. and Bishop, P. 2013. The fate of phosphorus of ash-rich biochars in a soil-plant system. *Plant and Soil* <http://link.springer.com/staticcontent/lookinside/395/art%253A10.1007%252Fs11104-013-1938-z/000.png>.

- Williams, M.M. and Arnott, J.C. 2010, A Comparison of variable economic costs associated with two proposed biochar application methods. *Annals of Environmental Science*. 4:23-30.
- Zimmerman AR, Gao B, Ahn M-Y (2011) Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biol Biochem*. 43:1169–1179.

CAPITULO TRES

TOXICIDAD DE BIOCARBONES

CAPÍTULO TRES

TOXICIDAD DE BIOCARBONES

3.1 INTRODUCCIÓN

El biocarbón es un producto sólido rico en carbono, que resulta de la combustión de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno. Debido a su estructura altamente aromática, el biocarbón es química y biológicamente más estable que la materia orgánica de la cual fue hecho Red de Investigadores de Biocarbón de Australia y Nueva Zelanda, 2012 (NAELLC, por sus siglas en inglés). La Iniciativa Internacional de Biocarbón (IBI, 2012) menciona que el principal objetivo de la fabricación y estudio del biocarbón es mejorar las funciones y procesos cuando aplicado al suelo. Sin embargo, tiene otras aplicaciones, como son: filtro para los gases que se producen en el proceso de pirólisis, producto inicial para la producción de fertilizante nitrogenado (Dumroese *et al.*, 2011), compuesto energético potencial, para retornar los nutrientes extraídos de la biomasa para cerrar los ciclos nutrimentales adecuadamente (Laird, 2008) y, principalmente, por su potencial para el secuestro de carbono (Spokas, 2010).

Las propiedades del biocarbón dependen principalmente de la naturaleza de la materia prima empleada para su fabricación, y del tamaño de partícula de la misma. También afectan a éstas las condiciones del proceso de elaboración, como son temperatura, tasa de aumento de temperatura, tiempo de residencia, entre otros (Spokas, 2010). Cuando el biocarbón es aplicado al suelo, su respuesta dependerá del tipo de suelo, clima y cultivo, dosis y método de aplicación.

Los resultados de su aplicación confirman que en la mayoría de los casos ha habido una respuesta favorable en las características y procesos del suelo; sin embargo, hay estudios en cuyos resultados son nulos o aun negativos (Cox y van Zwieten, 2012). Ese efecto negativo del biocarbón puede ser debido a la presencia de compuestos fitotóxicos que contenga, aunque por otra parte algunos biocarbones pueden tener la capacidad de adsorber y neutralizar compuestos fitotóxicos naturales que se encuentren en el suelo (Regovska *et al.*, 2012). Estos últimos investigadores evaluaron los efectos de seis biocarbones en el

crecimiento de plántulas y aleloquímicos presentes en el rastrojo de maíz (*Zea mays* L.). Las semillas de maíz fueron germinadas en extractos acuosos de biocarbones producidos de diversas materias primas, procesos termoquímicos y temperaturas. Los últimos autores citados evaluaron el porcentaje de germinación, altura de plántula y longitud radicular, y encontraron que no había efecto de los extractos de biocarbones en el porcentaje de germinación, pero sí en la altura de plántula y longitud radicular.

De manera general, cuando el biocarbón es aplicado a suelos degradados, tiene el potencial de aumentar la producción del cultivo y la calidad del suelo (Novak *et al.*, 2009). Entre las mejoras que el biocarbón puede realizar al ser aplicado al suelo, se ha mencionado que: aumenta la capacidad de intercambio catiónico, aumenta de pH (pues funciona como un agente de encalado), incrementa la capacidad de retención de humedad, disminuye la densidad aparente del suelo, aumenta la retención de nutrientes, en particular del P disponible para las plantas, aumenta la colonización de hongos micorrízicos, incrementa la infección de *Rhizobium*, mejora la resistencia de los cultivos al estrés biótico, optimiza la eficiencia en el uso de fertilizantes, mejora la aireación del suelo y la adsorción de elementos contaminantes, reduce los niveles de gases efecto invernadero presentes en la atmósfera, funciona en el suelo como un almacén de carbono recalcitrante, entre otros beneficios (Glasser *et al.*, 2002; Jeffery *et al.*, 2011).

La producción es aún artesanal en muchas partes del mundo y se considera que puede perfeccionarse con las tecnologías adecuadas, para generar conjuntamente energía y biocombustibles, en la forma de gas sintético y bioaceite, además del propio biocarbón.

Debido a que las materias primas empleadas para su elaboración pueden ser muy variables, y sus características físicas y las condiciones de pirólisis también, se infiere que el biocarbón que se produce no es único y sus propiedades variarán, sino que habrá una gama muy diversa de biocarbones con características particulares (Van Zwieten *et al.*, 2010).

Por todo ello, se hace necesario conocer la calidad de los biocarbones con el fin de determinar si es factible usarlos como mejoradores de suelos. La toxicidad es uno de los principales parámetros que define dicha factibilidad, ya que ésta puede

afectar a los vegetales y otros organismos propios del suelo, si durante el proceso de fabricación se produjesen algunas sustancias tóxicas.

La presencia de pequeñas cantidades de sustancias tóxicas en el biocarbón puede inducir una respuesta homeótica, que consiste en una influencia positiva sobre la germinación de la semilla o el crecimiento de las plántulas cuando la concentración de estas sustancias es baja. Al parecer, esto es resultado de un desarrollo de rizobacterias promotoras del crecimiento o de hongos después de la aplicación de biocarbón. Sin embargo, cuando esa concentración es alta, no hay el mismo resultado (van Zwieten *et al.*, 2012).

Entre dichas sustancias tóxicas los autores señalados mencionaron compuestos heterocíclicos nitrogenados, furanos sustituidos, fenoles y fenoles sustituidos, benceno y bencenos sustituidos, compuestos carboxílicos y alifáticos, los cuales varían de acuerdo a las condiciones de producción y a las materias primas.

El objetivo de este estudio fue evaluar la toxicidad de tres biocarbones derivados de rastrojos de maíz que se habían pirolizados a diferentes temperaturas y diferentes tamaños de partículas.

Para probar la toxicidad de los biocarbones se usaron las metodologías recomendadas por IBI (2012), que fueron descritas por Major (2010) en el Boletín 104 de la misma, tanto de evasión de lombrices como de inhibición de germinación de semillas.

La hipótesis nula del estudio con lombrices de tierra es: el efecto del suelo y de la mezcla de suelo-biocarbón es igual en la evasión de las lombrices.

La hipótesis nula del estudio sobre germinación de lechuga es: El efecto del suelo y de las mezclas suelo-biocarbón es igual en la germinación de las semillas de lechuga.

3.2 REVISIÓN DE LITERATURA

A pesar de la importancia de la actividad de las lombrices de tierra en el suelo, existe un limitado número de estudios que han evaluado el impacto en ellas en presencia de biocarbón (Weyers y Spokas, 2011). La Iniciativa Internacional de Biochar (IBI, 2012) ha considerado que el medir el efecto del biocarbón sobre ellas es un medio para evaluar la toxicidad de este producto, y también la realización de pruebas del efecto de los biocarbones sobre la germinación de las semillas de especies sensibles a compuestos químicos tóxicos. De esta manera se asegura que este producto no tiene dichos compuestos en cantidades que pudiesen provocar daños a las especies cultivadas o a los organismos del suelo. En ambos casos se trata de indicadores y no se puede descartar que haya mayor sensibilidad en alguna otra especie.

Weyers and Spokas (2011) realizaron una revisión de estudios de toxicidad de biocarbones sobre lombrices de tierra *Eisenia fetida*. Estos investigadores resumieron los impactos sobre el comportamiento, sobrevivencia, dinámica de poblaciones y daño celular de esta especie y mostraron que, en general, no había un efecto negativo sobre la sobrevivencia, comportamiento y población de lombrices. Sin embargo, algunas lombrices mostraron cambios en el DNA cuando el contenido de cenizas en el biocarbón era de 10%, cambios que dependían de las características del material probado, el lugar de estudio, el tipo de suelo y el pH del hábitat.

En un estudio sobre el efecto en el rendimiento agronómico y la fertilidad de dos suelos, un ferrosol y un calcarosol, de dos biocarbones de residuos de fábrica de papel obtenidos por pirólisis lenta, Zwieter *et al.* (2010) no encontraron efectos en la germinación de semillas de tres especies: trigo, frijol y rábano, lo que los hizo sugerir que no habrían compuestos nocivos. Estos investigadores también realizaron un estudio de comportamiento de lombriz *Eisenia fetida* Savigny que mostró una preferencia de las lombrices por los suelos ferrasoles tratados con los dos biocarbones, que en los sustratos empleados como control (suelo sin biocarbón). En el calcarosol no hubo diferencia significativa en la preferencia de las lombrices hacia el suelo tratado con biocarbón o sin él.

Bargmann *et al.* (2013) realizaron una investigación con cebada (*Hordeum vulgare* L.) de primavera, para evaluar los efectos tóxicos de biocarbones, hidrocarburos y aguas del proceso de carbonización hidrotérmica como mejoradores de suelo. Mientras el biocarbón no tuvo efectos en la germinación en términos generales, los hidrocarburos y las aguas de proceso generaron un impacto negativo inhibiendo la germinación de la cebada. La respuesta de los biocarbones que fueron producto de una carbonización en hornos, probablemente se debió a que los compuestos volátiles se evaporaron durante el proceso, reduciendo su potencial de daño.

Liesch *et al.* (2010) investigaron la aplicación de 0, 22.5, 45, 67.5 y 90 ton ha⁻¹ de biocarbones de virutas de pino y de camas de pollo en una mezcla de arena, caolín y *Sphagnum*, para medir la sobrevivencia y crecimiento de *Eisenia fetida* S. Todas las lombrices murieron con la dosis más alta de biocarbón de camas de pollo, muy probablemente debido a la volatilización de amoníaco a pH alto y al choque osmótico. La sobrevivencia de la lombriz y el crecimiento con la aplicación más baja de biocarbón de camas de pollo y todas las dosis de aplicación de biocarbón de virutas de pino no difirieron significativamente del testigo no enmendado.

Li *et al.* (2011) llevaron a cabo un estudio de un biocarbón producido a partir de virutas de manzano sobre el comportamiento *Eisenia fetida* S. Se trataba de evaluar la toxicidad potencial en esta especie, de suelos manejados con 1, 10 y 20 % del biocarbón de virutas de manzano. Las aplicaciones de dicho material correspondieron a aplicaciones de 18, 180 y 360 ton ha⁻¹ a una profundidad de laboreo de 20 cm, respectivamente. Estos autores analizaron la evasión de lombrices desde el suelo tratado a los 2 días y, además, evaluaron el intervalo de crecimiento y reproducción. Después de 28 días de incubación, las lombrices que habitaban en los tratamientos con biocarbón perdieron más peso que las del control. Sin embargo, el biocarbón no afectó su reproducción. En el sustrato con 1%, las lombrices no evadieron el sustrato tratado. Cuando éste contenía 10 y 20 % de biocarbón se presentó evasión. Para determinar la causa de la evasión de lombrices a estas concentraciones se llevaron a cabo otros experimentos y concluyeron que no fue el efecto del biocarbón sino la falta de humedad, ya que al tratar el suelo con biocarbón con las mismas dosis, a una humedad de capacidad

de campo, no hubo evasión. También señalaron que esto también pudo ser la causa de disminución de peso de las lombrices.

Existen pruebas biológicas que permiten medir la toxicidad de los biocarbones al ser adicionados al suelo con el uso de especies sensibles a sustancias tóxicas que pudieran inhibir su desarrollo o aún causarles la muerte. La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, 2012) tiene una guía para pruebas de químicos, que va desde 1984 a la fecha, entre las que se encuentran la de sustancias químicas tóxicas a lombrices de tierra (OECD, 1984) y la de inhibición de germinación de semillas (OECD, 2006). También la Organización Internacional de Estandarización, organización no gubernamental que reúne a 157 países para tener los estándares que requieren la sociedad en su contexto más amplio manejan la ISO 11268-1 de 1993 para toxicidad en lombrices y la ISO 11269-2 para emergencia de plántulas y crecimiento de 2005 (OECD, 2008).

Posteriormente, estos ensayos de evasión de lombrices han sido desarrollados por Van Zwieten *et al.* (2010), quienes tomaron y modificaron las metodologías de OECD (1984) e ISO 11268-1 de 1993 (OECD, 2008) para pruebas con biocarbón. Para el IBI (Major, 2010) sólo es necesaria la prueba de evasión que se realiza en 48 h, ya que con ésta se prueba la toxicidad del producto, mientras que para comportamiento, reproducción y cambios fisiológicos existen otras pruebas que van desde 14 a 30 días (OECD, 2004). En esta prueba de toxicidad se manejan *Eisenia fetida* Savigny o *Eisenia andrei* Bouché. Se fundamentan en colocar lombrices en suelo y mezclas de suelo-biocarbón en diferentes dosis para evaluar el número de lombrices que evadieron la mezcla y prefirieron el suelo solo.

El ensayo de germinación de semillas se basa en el porcentaje de plántulas emergidas en la mezcla de suelo-biocarbón con las diferentes dosis que se manejarán en un estudio particular (IBI, 2012). Las especies vegetales empleadas normalmente son lechuga ya que es muy sensible a la presencia de sustancias nocivas, rábano, trébol dulce (IBI, 2013). Sin embargo, la OECD maneja categorías de las especies y menciona por ejemplo zacate rye grass (*Lolium perenne* L), arroz (*Oryza sativa* L), avena (*Avena sativa* L), trigo (*Triticum aestivum* L) y sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) para la primera, mostaza

(*Brassica alba* (L.) Rabenh.), colza (*Brassica napus* L), rábano (*Raphanus sativus* L) para la segunda y frijol mungo (*Phaseolus aureus* Zuccagni), trébol rojo (*Trifolium pratense* L), lechuga (*Lactuca sativa* L) para la tercera.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio

El estudio de toxicidad de lombrices se realizó en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Edo. de México, en un invernadero a finales de julio de 2012 con una temperatura media de 18.1 °C al abrigo, una mínima de 14°C y una máxima de 22 °C (Estación de Montecillo, Edo. de México).

Suelo y biocarbones

El suelo usado para el sustrato junto con los biocarbones es un Regosol de textura media, fase lítica, traído de La Tinaja, Ver., con pH de 4.5, textura franco arenosa, porcentaje de humedad a capacidad de campo de 12.1 %, contenido de materia orgánica de 1.66%, 27.7 ppm de P extraíble con Olsen, 0.1 % de nitrógeno total y una capacidad de intercambio catiónico de 6.6 cmol.kg⁻¹, con acetato de amonio 1N neutral.

Los biocarbones derivados de pirólisis de rastrojo de maíz, tuvieron las características mostradas en el Cuadro 3.1.

Las metodologías para las pruebas de toxicidad de biocarbón las describe Major (2010), en el Boletín Técnico de IBI No. 104.

Prueba de evasión de lombrices *Eisenia fetida*

Esta prueba se realizó con el uso de recipientes cilíndricos de aproximadamente 2 L. en donde se dividió, verticalmente y en partes iguales, el volumen del recipiente con una lámina de plástico rígido y se llenó un lado con solo suelo y el otro con la mezcla de suelo-biocarbón correspondiente a cada tratamiento.

Posteriormente se sacó la lámina dura de plástico y se humedecieron los sustratos a capacidad de campo, similar para todos, al considerar que la cantidad adicionada de biocarbón a cada mezcla fue muy pequeña. Se colocaron 10

lombrices en la división de los sustratos para que las lombrices se movilizasen hacia el material de su preferencia. Se esperaron 48 h y entonces se volvió a poner la lámina rígida de plástico en cada recipiente para separar los dos sustratos: éstos se retiraron por separado y contaron las lombrices en cada uno de ellos.

Cuadro 3.1. Características de los biocarbones derivados de rastrojos de maíz¹.

Variable	Biocarbones		
Clave laboratorio	3562	3563	10540
Fecha de proceso	Mayo 2011	Mayo 2011	Agosto 2011
Materia prima	Maíz	Maíz	Maíz
Diámetro de materia prima	< 4 mm	>4 mm	< 4 mm
T °C Pirólisis	300	650	650
	<u>Características químicas</u>		
pH (03/04/13)	9.5	9.8	10.4
% CaCO ₃ equivalente	6.88	6.82	10.20
CIC (Cmol.Kg ⁻¹)			
23/09/11	12.70	11.80	17.10
28/08/13	19.39	20.40	19.85
% Cenizas Totales	49.80	16.97	37.65
% Materia Volátil	1.29	3.13	1.60
%C Total	45	64	56
% C Fijado	66.52	77.11	57.19
% N total	0.87	0.92	0.87
N mineral			
NH ₄ ⁺	43.81	20.56	43.81
ppm NO ₃ ⁻	41.56	32.66	71.98
P Soluble ppm	436	297	432
P Total %	0.20	0.20	0.23
K Total %	0.94	1.35	1.33
C/N	51.72	69.57	64.37
	<u>Características físicas</u>		
CE dS.m ⁻¹	1.86	2.84	3.75
% Humedad	2.39	3.79	3.56
Densidad aparente	0.44	0.39	0.38
g cm ⁻³			
Porosidad Total %	44.9	43.1	56.3
Porosidad de aireación %	16	11.1	19.9
Porosidad de retención	28.9	32.0	36.4
humedad%			
Retención Tensión	0		
de (Pa)	245.1	318.2	501.4
10132.5	197.1	255.3	402.2
humedad	50662.5	150.4	256.8
%	101325	135.4	222.8

¹ Metodologías de Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is used in soil (IBI, 2012).

El diseño experimental fue completamente al azar, en donde se consideraron cinco tratamientos, incluyendo el testigo, con 0, 5, 10, 15 y 20 ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón en el suelo. Cada tratamiento se repitió tres veces.

Aunque el criterio de interpretación es basado en la tendencia de las lombrices a escapar del sustrato tratado con las diferentes dosis de biocarbón o permanecer en él (IBI, 2012), se realizó una prueba de pares de t de Student.

Ensayo de inhibición sobre germinación

Para esta prueba se usó lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Climax como especie indicadora de inhibición de germinación. Previamente se midió el porcentaje de germinación en cajas Petri de 15 cm. de diámetro provistas en su fondo con papel filtro y humedecidas con agua destilada, sin ningún tipo de sustrato, lo cual se repitió cinco veces. Se colocaron cincuenta semillas en cada caja, las cuales se pusieron en una cámara de germinación regulada a una temperatura de 28°C. Se hizo el conteo de semillas germinadas a los 4, 7 y 14 días (International Rules for Seed Testing, 2009).

Para las pruebas de inhibición de germinación de estas semillas con los diferentes tratamientos mencionados arriba. Se usaron charolas con tapa de plástico transparente, de 20 x15 cm., las cuales fueron llenadas hasta una altura de 2 cm. con los sustratos de suelo-biocarbón; las charolas se pesaron para que todas tuvieran la misma cantidad de sustrato.

Se sembraron 50 semillas de lechuga cv. Climax (AQTEX) en cada charola, humedeciendo cuidadosamente el sustrato con agua destilada sin mover las semillas. Las charolas se pusieron en la cámara de germinación con temperatura, luminosidad y humedad constante. Se contaron las semillas germinadas a los 4, 7 y 15 días (International Rules for Seed Testing, 2009).

El diseño experimental de esta prueba fue completamente al azar con cinco tratamientos, incluyendo el testigo, con 0, 5, 10, 15 y 20 ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón en el suelo. Cada tratamiento se repitió tres veces. Se realizó un ANOVA con el programa SAS 9.0.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Prueba de evasión de lombriz de tierra (*Eisenia fetida*)

El análisis estadístico muestra los resultados de evasión de lombrices (Cuadro 3.2). No hubo diferencia estadística en casi todas las repeticiones, e

indistintamente se encuentran en el suelo solo o en el suelo con biocarbón, a excepción del biocarbón 10540 en la repetición 2 donde se define que las lombrices prefirieron el suelo con biocarbón. Los resultados muestran que no hubo evasión de lombrices en los sustratos con los diferentes niveles de biocarbón, lo cual coincide con los estudios realizados por Weyers y Spokas, (2011), lo que podría asegurar que no hay sustancias tóxicas en los biocarbones.

Cuadro 3.2. Prueba t de Student para lombrices en las diferentes dosis de biocarbón.

Biocarbón	ton ha ⁻¹ equivalentes	$\bar{x} \pm DE$	$\bar{x} \pm DE$	P
		Testigo (suelo)	Biochar más suelo	
3562	5	2.00±2.00	8.00±2.00	0.021
T=300°C	<4 mm	7.33±1.52	2.66±1.52	0.020
	15	5.00±2.00	5.33±1.52	0.830
	20	4.33±2.51	5.66±2.51	0.552
	3563	5	2.00±1.00	8.00±1.00
T=650°C	>4 mm	4.33±4.04	5.55±4.04	0.707
	15	3.66±0.57	6.33±0.57	0.005
	20	1.33±0.57	8.66±0.57	0.000
	10540	5	1.33±2.30	8.66±2.30
T=650°C	<4 mm	6.33±1.52	3.66±1.52	0.099
	15	5.00±2.64	5.00±2.64	1.000
	20	2.00±1.00	8.00±1.00	0.002

Prueba de germinación de semillas

El porcentaje de germinación de la semilla de lechuga (*Lactuca sativa*) var. Climax fue del 93 %. Los resultados de esta prueba se presentan en la Fig. 1. Sin embargo, con la ANOVA realizada (Cuadro 3.3) se acepta la Ho. que el efecto del suelo y de las mezclas suelo-biocarbón es igual sobre la germinación de las semillas de lechuga.

Cuadro 3.3. ANOVA de germinación de lechuga cv. Climax, de los tratamientos de biocarbón de 0, 5, 10, 15 y 20 ton ha⁻¹.

Fuente	DF	Suma de Cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F	F _t
Modelo	4	37.3333	9.3333	1.06	0.4248	4.33
Error	10	88	8.8			
Total correcto	14	125.3333				
R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Y Media	D.E.		
0.2979	3.1336	2.9665	94.6667	1.93		

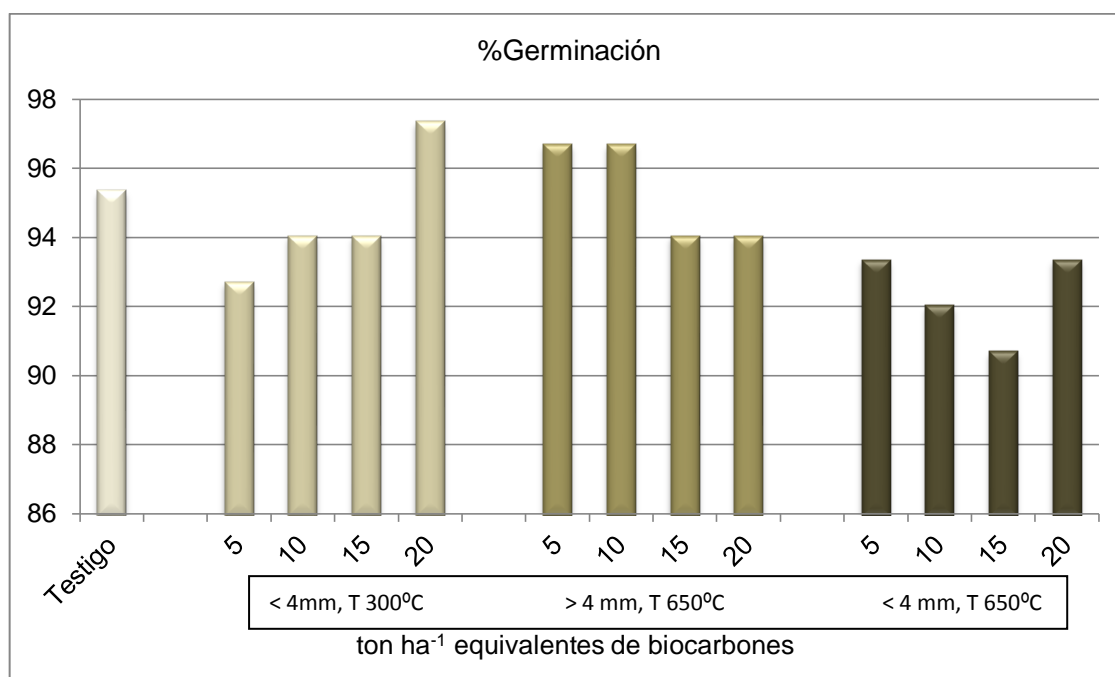


Figura 3.1. Germinación de semillas con suelo y biocarbones.

Cuadro 3. 4. Medias y desviaciones estándares de los tratamientos de germinación de lechuga cv. Climax.

Tratamiento	Dosis	$\bar{x} \pm DE$	CV
Testigo	0 ton ha ⁻¹	95±2.08	0.0002
Biocarbón			
	5 ton ha ⁻¹	93±0.58	~ 0
< 4 mm,	10 ton ha ⁻¹	94±1.00	0.0001
T 300°	15 ton ha ⁻¹	94±1.73	0.0002
	20 ton ha ⁻¹	97±1.53	~ 0
	5 ton ha ⁻¹	97±0.58	~ 0
>4 mm	10 ton ha ⁻¹	97±1.53	~ 0
T 650°C	15 ton ha ⁻¹	94±2.65	0.0003
	20 ton ha ⁻¹	94±1.00	0.0001
	5 ton ha ⁻¹	93±1.15	0.0001
< 4 mm	10 ton ha ⁻¹	92±1.00	0.0001
T 650°C	15 ton ha ⁻¹	90±1.15	0.0001
	20 ton ha ⁻¹	93±0.58	~ 0

3.5 CONCLUSIONES

Los análisis estadísticos permitieron llegar a la conclusión que no hay diferencia significativa en el comportamiento de los organismos sensibles utilizados en las pruebas de toxicidad entre las diferentes dosis de los tres biocarbones probados, con respecto al control (suelo solo). En la prueba de lombrices no hubo muerte de ninguna de ellas. Además se observó que en dosis altas de biocarbón las lombrices permanecían en los sustratos y no había una tendencia a escapar. Con respecto a la prueba de germinación de semillas de lechuga, su porcentaje de germinación fue alto, no observando síntomas de toxicidad, ni muerte de las plántulas, por lo que se considera que estos biocarbones pueden ser usados como mejoradores de suelo en función a estos parámetros.

3.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Australia and New Zealand biochar researchers network. 2012. Projects. ANZBRN website. at <http://www.anzbiochar.org/projects.html>. Julio 2013.
- Bargmann, I., Rilling, M.C., Buss, W., Kruse, A. and Kuecke, M. 2013. Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 199: 360-373.
- Cox, J. and van Zwieten, L. 2012. Chapter five. Use of biochar in crop systems. In: *Biochar in horticulture: Prospects for the use of biochar in Australian horticulture*. (Cox, J. Ed.). NSW Trade and Investment.. Australia.
- Cheng, C-H, Lehmann, J., Thies, J., Burton, S.D., Engelhard, M.H., 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry* 37: 1477-1488.
- Demirbas, A. 2004. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *J. Appl. Pyrolysis*. 72: 243-248.
- Dumroese, R.K., Heiskanen, J., Englund, K, Tervahauta, A. 2011. Pelleted biochar: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomasa and Bioenergy* 35: 2018-2027. www.sciencedirect.com. Febrero 2012.
- Glaser, B., J. Lehmann, and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review. *Biol. Fertil. Soils* 35:219–230.
- International Biochar Initiative. 2012. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>. Mayo 2012.
- International Biochar Initiative. 2013. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>. Abril 2013.
- International Rules for Seed Testing. 2009. International Seed Testing Association.
- Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., Bastos, A. C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 144 (1): 175–187.
- Laird, D.A. 2008. The charcoal vision: Win-win-win scenario for Ssimultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agron. J.* 100 (1):178-181.
- Li, D., Hockaday, W.C., Masiello, C.A. Alvarez, P.J.J. 2011. Earthworm avoidance of biochar can be mitigated by wetting. *Soil Biology & Biochemistry*. 43:1732-1737.
- Liesch A.M., Weyers S.L., Gaskin J.W., Das K.C. (2010) Impact of two different biochars on earthworm growth and survival. *Annals of Environmental Science* 4:1-9.
- Major, J. 2010. IBI Technical Bulletin # 104. International Biochar Initiative. Guía Básica para ensayos de biochar en el suelo. <http://www.biochar->

- international.org/sites/default/files/IBI%20Simple%20Guide-english.pdf.
Diciembre 2010.
- Novak, J.M., I. Lima, B. Xing, W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Srehrh, D.W. Watts, W.J. Busscher and H. Schomberg. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*. Vol 3:195-206.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. 1984. Earthworm acute toxicity tests no. 207. In: *Guideline for testing of chemicals*.
<http://browse.oecdbookshop.org/oecd/pdfs/free/9720701e.pdf>. Enero 2012.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. 2004. Earthworm reproduction for the testing of chemicals. No. 222. In: *Guideline for testing of chemicals*.
<http://browse.oecdbookshop.org/oecd/pdfs/free/9720701e.pdf>. Enero 2012
- Organisation for Economic Co-operation and Development . 2006. Terrestrial plants, growth test no. 208: Seedling emergence and seedling growth test: In *Guideline for testing of chemicals*.
<http://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/33653757.pdf>. Enero 2012
- Organization for Economic Co-operation and Development. 2008. Comparison between OECD test guidelines and ISO standards in the areas of ecotoxicology and health effects. *Series on Testing and Assessment Number 99*.
- Organization for Economic Co-operation and Development. 2012. *Guidelines for the testing of chemicals, Section 2: Effects on Biotic Systems*. OECD I Library. http://www.oecd-ilibrary.org/environment/oecd-guidelines-for-the-testing-of-chemicals-section-2-effects-on-biotic-systems_20745761.
Octubre 2012.
- Rogovkka, N., Laird, D., Cruse, R.M., Trabue, S. Heaton, E. 2012. Germination tests for assessing biochar quality. *J. of Environ. Qual.* 41:1014-1022.
<http://www.citeulike.org/user/millan13/article/11553538>. Octubre 2012.
- Spokas, K.A. 2010. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management* 1: 289-303.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K.Y., Downie, A. Rust, J., Joseph, S. Cowie, A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 327:235-246.
<ftp://ftp.dpvta.uniud.it/peressotti/Biochar/2010/NSW-Van%20Zwieten2010-Effects%20of%20biochar%20from%20slow%20pyrolysis%20of%20papermill%20waste%20on%20agronomic%20performance%20and%20soil%20fertility.pdf>. Enero 2011.
- Van Zwieten, L., Singh B.P. and Cox, J. 2012. Chapter four. Biochar effects on soil properties. In: *Biochar in horticulture: Prospects for the use of biochar in australian horticulture*. (Cox, J. Ed.). Australia.
- Weyers, S.L. and Spokas, K.A. Impact of biochar on earthworm populations: A review. *Applied and Environmental Soil Science*. 2011: 1-12.

CAPITULO CUATRO

APLICACIÓN DE BIOCARBONES DE MAÍZ A UNA GRAMÍNEA

CAPITULO CUATRO

APLICACIÓN DE BIOCARBONES DE MAÍZ A UNA GRAMÍNEA

4.1 INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2013) advirtió que para alimentar a una población creciente, la cual se estima de 9 mil millones de personas a nivel mundial para 2050, la producción de alimentos deberá crecer en 70%. Este organismo aseguró que la inversión pública y privada tendrá que aumentar con mayor efectividad, consideró además, que gran parte del incremento tendrá que provenir de mejoras en productividad como resultado de la innovación y uso de la tecnología, que la producción tendrá que ser ambientalmente sustentable ya que los recursos naturales son limitados en muchas regiones están sobreexplotados.

La aplicación de biocarbón (biochar) al suelo como una tecnología que podría aumentar la productividad de los cultivos de manera sustentable, ha provocado una respuesta favorable en el aumento de la producción de diversos cultivos a nivel experimental, tanto en invernadero como en pequeños estudios en campo (Lehmann and Joseph, 2009; Glaser *et al.*, 2001). Se han obtenido beneficios económicos por su adición al suelo no sólo por el incremento de la producción, sino también por la mejora en la eficiencia del uso de fertilizante nitrogenado, la reducción de emisiones de N₂O, así como la reducción de los residuos agrícolas empleados para su producción (Roberts *et al.*, 2010).

Sin embargo, el uso de esta tecnología no se ha extendido mucho en el mundo debido a que aun no se tienen resultados consistentes de su aplicación en diferentes cultivos, suelos y climas. El biocarbón puede alterar las características nutricionales del suelo, así como las actividades biológicas de diferente forma dependiendo los agroecosistemas (Rondon *et al.*, 2007; Van Zwieten *et al.*, 2010). Por ello, es necesario realizar estudios en diferentes condiciones específicas que permitan tener una visión general de sus beneficios.

El biocarbón como una práctica de manejo en los sistemas agrícolas en grandes extensiones (incluyendo productores pequeños y empresariales) podría generar resultados ambientales positivos. El uso de esta tecnología por los agricultores

tendría el potencial de mejorar la productividad agrícola y la calidad de sus suelos (McHenry, 2009). De hecho al ser aplicado al suelo tiene un efecto a corto plazo en sus funciones de nutrición, en la retención de humedad y en la actividad microbiana (Atkinson *et al.*, 2010), pero también uno a largo plazo por la naturaleza recalcitrante del biocarbón, que influenciaría los procesos de formación del suelo que gobiernan la acumulación, transformación y translocación de los constituyentes del suelo y modificaría la actividad pedogénica, la morfología y la productividad (Richter, 2007).

En los últimos años el biocarbón ha sido objeto de estudios en varios lugares del mundo (Lehmann y Joseph, 2009; Sohi *et al.*, 2009) que generaron los conocimientos iniciales de algunas características de este producto, pero se requiere mayor investigación que demuestre de manera segura las ventajas de su aplicación al suelo y, en general, al ambiente, incluyendo su efecto en la salud humana. De manera particular se requiere más información del efecto que tiene su aplicación al suelo y a los cultivos, particularmente demostrar sus beneficios en el aumento de la productividad y en las mejoras de las propiedades químicas y físicas de diferentes tipos de suelos y sustratos.

El objetivo general del presente estudio fue: Evaluar el efecto de tres biocarbones producidos en diferentes condiciones de temperatura, y como materia prima base rastrojo de maíz con diferente tamaño de partículas, en la producción de biomasa y estado nutricional de N, P y K de una planta indicadora (*Lolium perenne* L.), en presencia de fertilización química y lombricomposta.

Las hipótesis nulas son:

Las dosis de biocarbón aplicadas al suelo tienen el mismo efecto sobre la biomasa aérea de las plantas de la especie indicadora y sobre la concentración nitrógeno, fósforo y potasio en ésta.

El efecto de biocarbón mezclado con fertilizante químico es igual al del biocarbón mezclado con una lombricomposta.

4.2 REVISIÓN DE LITERATURA

El empleo de biocarbón no es una práctica habitual en el mundo por un gran número de productores, sin embargo, su uso a nivel de invernadero y pequeñas pruebas en parcelas y con diferentes cultivos se ha reportado frecuentemente (Lehmann y Rondon, 2006; Sohi *et al.*, 2009)

Estudios de Salomón *et al.* (2007) en los suelos oscuros de la Amazonia brasileña (*Terra Preta*), que son suelos desarrollados como consecuencia de una intensa actividad antropógena y que los han transformado en antrosoles, concluyeron que existen en ellos compuestos orgánicos como estructuras poliaromáticas que han persistido por miles de años, y que son la base de los compuestos recalcitrantes de carbono orgánico, mismos que los diferencian de la composición de suelos adyacentes. La presencia de grandes proporciones de estructuras de carbono aromáticas, carbono carboxílico y estructuras alifáticas de carbono y su persistencia por miles de años en dichos suelos ricos en carbón negro, es de la más amplia importancia a nivel global, no sólo desde el punto de vista de servir como un depósito de carbono, sino también en la perspectiva de la sustentabilidad del ambiente y de la agricultura.

La posible influencia de biocarbones en las características de retención de nutrientes de suelos ha sido identificado por diversos grupos de investigadores (Glaser *et al.*, 2001; Lehmann y Rondon, 2006). Glaser *et al.* (2001) atribuyeron la cualidad de alta retención de nutrientes del suelo de *Terra Preta* de Indio a la elevada proporción de carbón negro o biocarbón. Se ha demostrado un incremento en la disponibilidad de cationes así como de fósforo y nitrógeno cuando se adiciona carbón de madera a los suelos. Tal incremento ocurre a pesar de los muy bajos contenidos iniciales de estos nutrientes en estos productos. Glaser *et al.* (2001) y Lehmann y Rondon (2006) han mostrado que los bajos valores de nutrientes de los carbones hechos de residuos verdes favorecen el uso eficiente de nutrientes por las plantas, como el nitrógeno y fósforo aplicado como fertilizante. Esto puede ser explicado por: a) el carbón tiene una superficie de retención que mantiene los nutrientes en la zona de las raíces minimizando su lixiviación, b) el carbón influencia la estructura física y/o química del suelo con

que interactúa (por ejemplo densidad aparente y el pH) de modo que altera positivamente sus ciclos nutrimentales y la capacidad de retención de humedad.

En un estudio en suelos nativos de Kenia, Lehmann *et al.* (2007) llegaron a la conclusión que las perturbaciones antropógenas por el uso de estos suelos para la agricultura, modificaban profundamente sus ciclos biogeoquímicos, siendo el principal cambio del ciclo global del carbono. Estos últimos autores determinaron una reducción de cerca del 85% del nitrógeno y carbono orgánico original en la superficie del suelo por el uso, disminuyendo su calidad y los potenciales de los ecosistemas nativos tropicales y subtropicales para servir como un reservorio de carbono. Una gran proporción de tal disminución se determinó a los 4 años de haber cambiado el uso del suelo, estabilizándose a los 20 años.

Estudios agronómicos recientes realizados por Blackwell *et al.* (2007) en Australia, mostraron que la aplicación de 6 ton ha⁻¹ de biocarbón en banda profunda a un cultivo de trigo, en áreas con baja precipitación, resultaron en una mayor producción de trigo. Asimismo observaron que la aplicación tenía un efecto en la colonización de micorrizas vesículo-arbusculares (VAM).

La proliferación de microorganismos benéficos, principalmente los simbióticos, tales como las bacterias fijadoras de nitrógeno y los hongos micorrízicos, que desempeñan un papel muy importante en el crecimiento de las plantas como respuesta a la adición de carbón procedente de madera y bambú fue también reportada. Yoshizawa *et al.* (2007) de Japón.

Benites *et al.* (2007) de Brasil, aplicaron biocarbón a guaraná (*Paullinia cupana* hbk. cv. Sorbilis), un cultivo importante para pequeños productores en el Amazonas, junto con tratamientos adicionales con pollinaza, biocarbón y harina de huesos, y concluyeron que existió una interacción entre el biocarbón y el abono de pollo, y que el magnesio en el cultivo se incrementó en función del aumento de los niveles de biocarbón.

En Australia se investigaron los rangos y mecanismos de la interacción de diversos carbones con nitrógeno y fósforo en una serie de pruebas de adsorción/desorción en los flujos de nutrientes (Downie *et al.*, 2007). El carbón, el suelo y las mezclas de suelo-biocarbón fueron analizados antes y después de

la adición de nutrientes, para cuantificar las características de retención de los nutrientes, incluyendo los rangos de las reacciones. La retención de fósforo estuvo correlacionada con el pH y el contenido de Ca del carbón. Carbones procedentes de las camas de aves de corral y residuos de papel, con elevados contenidos de calcio, tuvieron mayor capacidad de retención de fósforo ($> 3000 \text{ mg kg}^{-1}$), similar a la de los suelos de alta capacidad de retención, mientras que el carbón de residuos verdes tuvo relativamente baja capacidad de retención de fósforo ($\sim 1000 \text{ mg kg}^{-1}$). Al examinar los productos del biocarbón después de la adición de fósforo, se confirmó la precipitación de este elemento en complejos Ca-P. Ninguno de los carbones retuvo cantidades significativas de nitrógeno.

Frossard *et al.* (1995) consideraron que la adición de biocarbón al suelo (5-15 cm) en dosis de 50 a 3000 mg kg^{-1} , pudo tener una influencia positiva en el ciclo del fósforo por el incremento de la capacidad de retención, especialmente para suelos con baja capacidad de ésta. Sin embargo, los incrementos en la disponibilidad de nitrógeno no fueron explicados por un mecanismo parecido. Este trabajo demuestra la notable necesidad de diferenciar entre el concepto de retención de nutrientes y la eficiencia en el uso de nutrientes por las plantas cuando se trata de dilucidar la influencia del carbón sobre los ciclos nutrimentales en los sistemas de suelo.

Fong (2011) realizó un experimento en invernadero para evaluar el efecto en diversas dosis de un biocarbón con y sin fertilizante (20-20-20 Professional Water Soluble General Purpose fertilizer) adicionado cada tercer día sobre el crecimiento de *Lolium multiflorum* en un suelo Alfisol de California. Las dosis empleadas fueron 0, 10, 25 y 50 ton ha^{-1} . Los tejidos evaluados fueron raíces y brotes foliares. Sus resultados mostraron que el crecimiento de los brotes se incrementó con 25 ton ha^{-1} de biocarbón y fertilizante aplicado, en 7.77 g/maceta con referencia al control (suelo sin fertilizar y sin biocarbón) y 1.52 g/maceta con fertilizante solo. La producción del *L. multiflorum* aumentó al incrementar la adición del biocarbón y aunque el fertilizante acrecentó el crecimiento de la planta, concluyeron que el crecimiento mínimo de ésta podría haber sido por el biocarbón. El efecto combinado de biocarbón y fertilizante no fue significativo.

En China, Wang *et al.* (2012) llevaron a cabo una investigación en macetas con un biocarbón de pH 9.1 producido a partir de residuos de arroz a 450°C en una planta pirolizadora local; usaron dos suelos: un Antrosol estagnico y un Antrosol órtico. Emplearon tres dosis del biocarbón: 0, 25 y 50 ton ha⁻¹ para el primer suelo y de 0, 10, 25 y 50 ton ha⁻¹ para el segundo. Como cultivos indicadores usaron una rotación de cultivo arroz-trigo. Además hicieron aplicaciones de 0 y 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno. Los resultados mostraron que la incorporación del biocarbón en ambos suelos incrementó la producción de grano de arroz y trigo, así como la biomasa cuando fue aplicado con el fertilizante nitrogenado.

Una meta-análisis de los efectos de la aplicación de biocarbón a los suelos en la producción de los cultivos realizada por Jeffery *et al.* (2011), arrojó como resultado que la adición de biocarbón al suelo producía pequeños aumentos (incremento medio de 10 %) pero estadísticamente significativos en la productividad de los cultivos. Sin embargo, no todos los estudios presentaban datos completos en cuanto a tipos de suelos, condiciones de manejo y ambientales. El meta-análisis cubrió un amplio rango de respuestas de -28 % a 39 %. El mayor efecto positivo se observó en los de pH ácido (14 %) y neutros (13 %), y en aquellos con textura arenosa (10 %) o media (13 %). Esto sugirió que dos de los principales mecanismos para el incremento de producción puede ser el efecto de “encalado” y una mejora en la capacidad de retención de humedad del suelo, junto con la mejora de la disponibilidad de nutrientes para el cultivo. Los resultados positivos más grandes fueron vistos con aplicaciones de biocarbón en una dosis de 100 ton ha⁻¹ (39 %).

Cox and van Zwieten (2012) reportaron que la aplicación de biocarbón en campos agrícolas generaba, en la mayoría de ensayos efectos benéficos en la producción de los cultivos: 58 % registraron un aumento de la producción pero en 37 % no hubo diferencias significativas. Estos mismos investigadores aseguraron que hay diversos ejemplos donde las producciones de los cultivos se han incrementado 2 o 3 años después de la aplicación inicial de biocarbón.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron tres experimentos independientes, en invernadero, con tres biocarbones derivados de rastrojos de maíz, cuyas propiedades se muestran en el Cuadro 4.1. Los biocarbones preparados se diferenciaban por las características del proceso de pirólisis, con las que se generaron, lo cual se supone tiene un efecto en las plantas cultivadas (Lehmann and Joseph, 2009). Para el Experimento 1 se usó el biocarbón 3562 (<4mm de partícula de biomasa original, T 300°C), para el Experimento 2, el biocarbón 3563 (> 4mm de partícula de biomasa original y T 650°C) y en el Experimento 3 el biocarbón 10540 (< 4mm de partícula de biomasa original y T 650°C). La especie indicadora fue zacate ryegrass (*Lolium perenne*).

Los experimentos fueron realizados en macetas de 5 kg de capacidad que se llenaron con un Regosol de textura media con fase lítica (Cuadro 4.2) extraído de una profundidad de 0 – 25 cm, 3.5 kg para el caso de los tratamientos con fertilización química y 2.3 kg para los tratamientos que emplearon lombricomposta, como se detalla más adelante en esta sección. Los tratamientos ensayados (biocarbón con fertilizante químico o biocarbón con lombricomposta) se mezclaron íntimamente con el suelo antes de sembrar el cultivo indicador. A todas las macetas de los tratamientos con fertilización química básica se les aplicó una cantidad equivalente a 80, 120 y 40 kg ha⁻¹ de N como nitrato de amonio, P₂O₅ como superfosfato triple y K₂O como sulfato de potasio.

A los tratamientos con lombricomposta, en la mezcla correspondió al 30% en peso del total del sustrato. Antes de colocar el suelo y la mezcla de lombricomposta con biocarbón en las macetas se les midió su capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente (Cuadro 4.3). La distribución de los tratamientos en el invernadero fue completamente al azar. El diseño experimental empleado para el análisis de los datos fue completamente al azar.

Cuadro 4.1. Características de proceso de obtención, propiedades químicas y físicas de los biocarbones de maíz ensayados.

Variable	Biocarbones		
Clave laboratorio	(3562)	(3563)	(10540)
Fecha de proceso	Mayo 2011	Mayo 2011	Agosto 2011
Materia prima	Maíz	Maíz	Maíz
Diámetro de materia prima	< 4 mm	>4 mm	< 4 mm
T °C Pirólisis	300	650	650
		<u>Características químicas</u>	
pH (03/04/13)	9.5	9.8	10.4
% CaCO₃ equivalente	6.88	6.82	10.20
CIC (Cmol.Kg⁻¹)			
23/09/11	12.70	11.80	17.10
28/08/13	19.39	20.40	19.85
% Cenizas Totales	49.80	16.97	37.65
% Materia Volátil	1.29	3.13	1.60
%C Total	45	64	56
% C Fijado	66.52	77.11	57.19
% N total	0.87	0.92	0.87
N mineral	43.81	20.56	43.81
ppm	41.56	32.66	71.98
P Soluble ppm	436	297	432
P Total %	0.20	0.20	0.23
K Total %	0.94	1.35	1.33
C/N	51.72	69.57	64.37
		<u>Características físicas</u>	
CE dS.m⁻¹	1.86	2.84	3.75
% Humedad	2.39	3.79	3.56
Densidad aparente	0.44	0.39	0.38
g cm⁻³			
Porosidad Total %	44.9	43.1	56.3
Porosidad de aireación %	16	11.1	19.9
Porosidad de retención	28.9	32.0	36.4
humedad%			
Retención Tensión	245.1	318.2	501.4
de (Pa)	197.1	255.3	402.2
humedad	139.6	150.4	256.8
%	110.1	135.4	222.8

Cuadro 4.2. Características físicas y químicas del suelo empleado en los tres biocarbones¹.

Características	Valor	Método
Químicas		
pH	4.5	Potenciométrico 1:2 suelo:agua
%Materia orgánica	1.66	Walkey Black
% N	0.1	Micro Kjeldahl
P ppm	27.7	Bray P1
% C	1.30	TOC
CIC cmol.kg-1	6.6	Acetato de Amonio 1N neutral
K cmol. kg -1	0.4	Flamometría
Ca cmol. kg -1	1.5	EEA
Mg cmol. kg -1	0.3	EEA
Na cmol. kg -1	0.1	Flamometría
Físicas		
CE $\mu\text{S.m}^{-1}$	151.0	Conductivimétrico
% Humedad	1.2	Gravimétrico
% Arena	66.7	
% Limo	21.7	
% Arcilla	11.6	
Textura	Franco arenoso	Bouyoucus
Densidad aparente g cm^{-3}	1.15	Columnas de Colman
% Humedad a CC	12.1	Olla de presión
% Humedad a PMP	6.7	Membrana de presión

¹ CE Conductividad eléctrica, CC capacidad de campo, PMP punto de marchitamiento permanente, TOC Carbon Organic Total, CIC capacidad de intercambio catiónico, EEA Espectrometría de absorción atómica.

Cuadro 4.3. Características de retención de humedad de la mezcla sustrato más lombricomposta¹.

Característica¹	Valor	Método
% Humedad a CC	20.6	Olla de presión
% Humedad en el PMP	16.9	Membrana de presión

¹ CC=capacidad de campo; PMP=Punto de marchitamiento permanente.

Los tratamientos fueron los tres biocarbones indicados, que fueron ensayados en tres experimentos independientes. Los biocarbones se ensayaron mezclados con el fertilizante químico o con lombricomposta. Cada biocarbón se aplicó en dosis

equivalentes a 0, 5, 10, 15 y 20 ton ha⁻¹ en cada uno de ellos. Esta cantidad se calculó con base al contenido nutricional de la lombricomposta (Cuadro 4.4) y de su lenta disponibilidad de los nutrientes. Cada tratamiento se repitió cuatro veces.

Cuadro 4.4. Características físicas y químicas de la lombricomposta empleada en los tres biocarbones.

Característica	Valor	Característica	Valor
% Humedad	28.8	% Ca	3.62
pH	8.1	Na ppm	0.22
CE $\mu\text{S m}^{-1}$	6.58	Fe ppm	208
% N	1.55	Cu ppm	134
% P	1.50	Zn ppm	250
% K	1.03	Mn ppm	578
% Mg	0.90		

Los parámetros de respuesta que se evaluaron fueron biomasa aérea, porcentaje de nitrógeno, fósforo y potasio en la biomasa aérea y contenido de los mismos.

Preparación del suelo. El suelo fue homogeneizado perfectamente y las piedras con tamaño superior a 5 mm eliminadas con el uso de una malla de plástico.

Los biocarbones se pesaron de manera individual para cada unidad experimental para obtener dosis equivalentes a 5, 10, 15 y 20 ton ha⁻¹ en 3.5 kg de sustrato cuando se usó fertilización química. La aplicación de fósforo y potasio se hizo al inicio de los experimentos, mezclándolos completamente primero con el biocarbón y después la mezcla de ambos con el suelo de cada maceta. La fertilización nitrogenada se aplicó semanalmente en el riego (15 mL de una solución de 100 ppm de nitrato de amonio a cada maceta). Cuando se usó abono orgánico, el sustrato utilizado se preparó con una mezcla del suelo con lombricomposta, la cual se mezcló adecuadamente con el biocarbón de manera inicial, y posteriormente se hizo con el suelo de cada maceta. De esta manera se consideró que habría un aporte de nutrientes por este abono orgánico.

Siembra. Ésta se realizó en el mes de febrero de 2012, con temperaturas ambientales en el invernadero de medias a bajas. Se colocó 1 g de semilla de *Lolium perenne* (cerca de 400-450 semillas) en cada maceta, de la cual se había sustraído una cantidad de sustrato aproximadamente igual para cada maceta y suficiente para cubrir la semilla a menos de 1 cm de profundidad.

Control de malezas. Se realizó manualmente por su extracción con pinzas.

Riego. Los riegos se hicieron en un inicio diariamente sin permitir drenar el agua. Finalmente se hicieron riegos que permitieron un ligero drenado para evitar problemas de salinidad, bajando el pH del agua de riego a un valor de 5.5-6 adicionando ácido sulfúrico, y midiendo el pH con un potenciómetro manual.

Variables de respuesta

Biomasa aérea. Se realizaron cuatro cortes de biomasa aérea con tijeras a la altura del borde de la maceta, la primera a los 60 días y los otros tres cada mes. Las muestras se colectaron en bolsas de papel estraza horadadas para ventilación. Ssecaron en la estufa a 70°C durante 4 a 5 días hasta alcanzar peso constante para tener el peso de la biomasa seca de cada maceta. Posteriormente se molieron en un molino Wiley provisto de malla 60 y se colocaron en bolsas de papel grueso, selladas con cinta adhesiva para su posterior análisis químico.

Contenido nutricional. Los contenidos o concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio en cada una de las muestras obtenidas de todos los cortes, con las metodologías empleadas en el laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio, Campus Montecillo.

Análisis visual de raíces. Se recuperaron las raíces de las plantas de cada unidad experimental sacándolas cuidadosamente del sustrato y se tomaron fotografías para evaluar visualmente su crecimiento.

Se realizó el análisis estadístico de ANOVA y prueba de Tukey con un diseño completamente al azar en cada experimento con el programa SAS 9.0 y SPSS Statistics 20.

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa

La biomasa de *L. perenne* colectada en cada corte y la acumulada, correspondiente a cada uno de los tres ensayos, del experimento con dosis crecientes de biocarbón mezclado con suelo y tratado con fertilización inorgánica y lombricomposta se presentan en el Cuadro 1 del Anexo 1.

En el Cuadro 4.5 se muestran los promedios de biomasa con sus respectivas desviaciones estándares y coeficientes de variación correspondientes a los tres biocarbones y cuatro cortes de este parámetro.

En general no hubo un efecto de la dosis de biocarbón con fertilización inorgánica o con lombricomposta. Hubo algunas excepciones que las señalaremos al discutir cada uno de los biocarbones ensayados. Sin embargo, en todos los casos hubo una clara respuesta a la aplicación de lombricomposta, lo que sugiere o un efecto en el abastecimiento nutrimental a lo largo del periodo experimental o un efecto sobre alguna propiedad física del sustrato. Ninguna de éstas fue controlada, porque no se esperaba una respuesta de esta naturaleza.

Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, 300°C (Experimento 1)

En general, no hubo diferencias significativas en producción de biomasa acumulada por efecto de la dosis de biocarbón adicionada, pero una clara diferencia entre los tratamientos con fertilización inorgánica y aquellos con lombricomposta (Figura 4.1). Fue común que estos últimos tuvieron mayor rendimiento acumulado que los primeros (Cuadro 4.5). En la Figura 4.2 se graficaron las medias y desviaciones estándares de la biomasa de los cuatro cortes cuando se aplicó el biocarbón < 4 mm y T 300°C. Aquí se aprecia claramente la dinámica de la producción de biomasa con lombricomposta y fertilización química en cada corte; la biomasa producida por corte fue siempre mayor e independiente de la dosis de biocarbón.

En la Figura 4.3 se muestra la dinámica de la biomasa acumulada a lo largo del

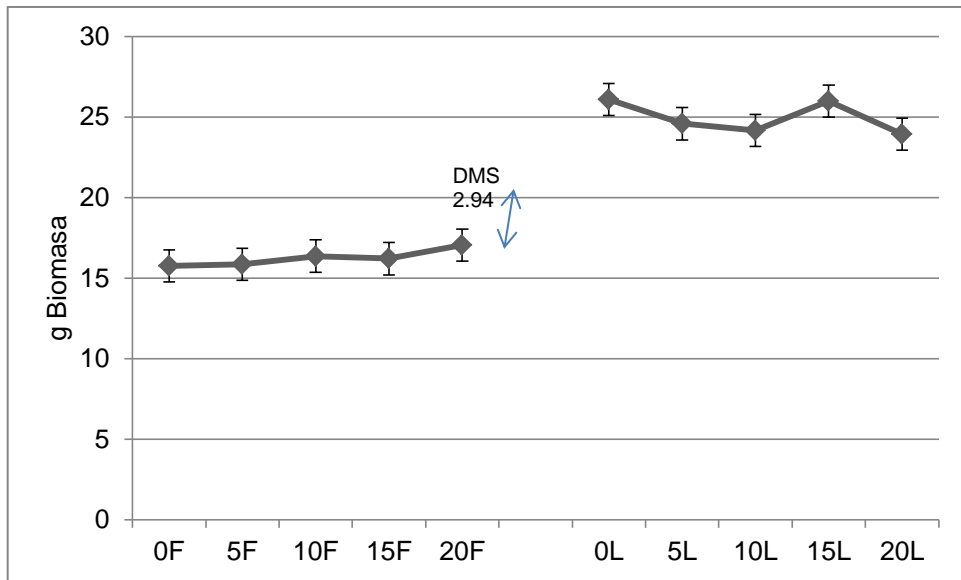
Cuadro 4.5. Medias de biomasa de los tres biocarbones

BIOMASA g maceta ⁻¹										
Dosis	Corte 1		Corte 2		Corte 3		Corte 4		Biomasa acumulada	
	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV
Experimento 1 (Biocarbón < 4 mm y T 300°C)										
0F	7.41±0.57c	7.7	3.08±0.24b	7.8	2.80±0.04b	1.4	2.43±0.12b	4.9	15.74±1.13b	7.2
5F	7.50±0.39c	5.2	3.20±0.20b	6.2	2.76±0.52b	18.8	2.37±0.53b	22.4	15.85±0.82b	5.2
10F	7.47±0.22c	2.9	3.46±0.37b	10.7	2.89±0.37b	12.8	2.53±0.18b	7.1	16.35±0.46b	2.8
15F	7.64±0.44c	5.8	3.38±0.36b	10.7	2.62±0.43b	16.4	2.55±0.46b	18.0	16.2±0.68b	4.2
20F	7.79±0.33bc	4.2	3.25±0.13b	4.0	3.05±0.21b	6.9	2.94±0.06b	2.0	17.04±0.56b	3.3
0L	8.09±0.34a	4.2	5.68±0.69a	12.1	6.13±1.07 ^a	17.5	5.31±0.71 ^a	13.4	26.07±1.99 ^a	7.6
5L	8.90±0.39a	4.4	4.99±0.55a	11.0	5.4±0.61 ^a	11.	5.21±0.37 ^a	7.1	24.57±1.28 ^a	5.2
10L	8.94±0.45a	5.0	5.16±0.81a	15.7	5.23±0.57 ^a	10.9	4.81±0.28 ^a	5.8	24.15±1.33 ^a	5.5
15L	8.67±0.25ab	2.9	5.91±0.92a	15.6	5.90±0.57 ^a	9.7	5.49±1.49 ^a	27.1	25.97±1.89 ^a	7.3
20L	8.78±0.32a	3.6	5.10±0.56a	11.0	5.19±0.50 ^a	9.6	4.83±0.60 ^a	12.4	23.91±0.94 ^a	3.9
Experimento 2 (Biocarbón > 4 mm y T 650°C)										
0F	7.84±0.43c	5.5	3.31±0.30b	9.1	2.61±0.22 ^a	8.4	2.83±0.15b	5.30	16.6±0.49b	2.9
5F	7.23±0.52c	7.2	3.32±0.52b	15.7	2.74±0.23 ^a	8.4	2.62±0.19b	7.2	15.93±1.2b	7.5
10F	8.06±0.57bc	7.1	3.61±0.26b	7.2	2.94±0.23 ^a	7.8	2.94±0.33b	11.2	17.56±0.74b	4.2
15F	8.65±0.50abc	5.9	3.41±0.29b	8.5	3.00±0.21 ^a	7.0	2.84±0.32b	11.3	17.92±0.74b	4.1
20F	8.84±0.59abc	6.7	3.54±0.36b	10.2	3.13±0.30 ^a	9.6	2.78±0.36b	12.9	18.29±0.24b	1.3
0L	9.63±0.66ab	6.9	7.02±0.77 ^a	11.0	6.51±0.52b	8.0	6.03±1.24 ^a	20.6	29.2±2.87 ^a	9.8
5L	9.74±0.46 ^a	4.2	6.61±0.27 ^a	4.1	7.08±2.36b	33.3	6.50±1.03 ^a	15.8	29.94±1.67 ^a	5.6
10L	9.72±1.13 ^a	11.3	6.21±0.96 ^a	15.5	5.70±2.36b	41.4	6.37±1.74 ^a	27.3	28.01±2.57 ^a	9.2
15L	9.77±0.86 ^a	8.0	7.19±0.74 ^a	10.3	6.53±0.60b	9.2	7.08±0.44 ^a	6.2	30.59±1.61 ^a	5.3
20L	10.27±0.75 ^a	7.0	6.50±0.56 ^a	8.6	6.96±0.90b	12.9	6.28±1.43 ^a	22.8	30.03±2.87 ^a	9.6
Experimento 3 (Biocarbón < 4 mm y T 650°C)										
0F	8.86±1.63bc	18.0	3.38±0.77bc	22.8	2.44±0.18b	7.4	2.58±0.34b	13.2	17.26±2.64b	15.3
5F	8.66±0.28c	3.3	3.31±0.63c	19.0	2.51±0.16b	6.37	3.16±0.49b	15.5	17.65±0.79b	4.5
10F	9.80±0.72abc	7.5	3.63±0.52bc	14.3	3.61±1.96b	54.3	2.77±0.20b	7.2	19.81±1.83b	9.2
15F	8.89±0.94bc	10.6	3.09±0.85c	27.5	2.81±0.25b	8.9	2.70±0.24b	8.9	17.5±1.31b	7.5
20F	7.97±1.41c	17.7	3.30±0.51c	15.4	2.56±0.12b	4.7	2.61±0.29b	11.1	16.45±1.87b	11.3
0L	10.80±0.32ab	2.9	5.23±1.39abc	26.6	6.72±0.82a	12.2	6.60±0.69a	10.4	29.38±2.84a	9.7
5L	10.96±0.19a	1.7	4.17±3.16abc	75.9	7.48±0.67a	9.0	7.09±0.20a	2.8	29.71±3.72a	12.5
10L	9.71±0.11abc	1.1	6.71±0.57a	8.5	6.95±0.78a	11.2	6.87±0.63a	9.2	30.26±1.57a	5.2
15L	11.45±0.40a	3.5	6.39±0.86ab	13.5	6.86±0.55a	8.0	6.94±0.68a	9.8	31.66±1.95a	6.2
20L	10.71±0.34ab	3.2	5.25±0.57abc	10.9	6.63±0.95a	14.3	6.79±0.56a	8.2	29.39±1.69a	5.7

Nota: 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

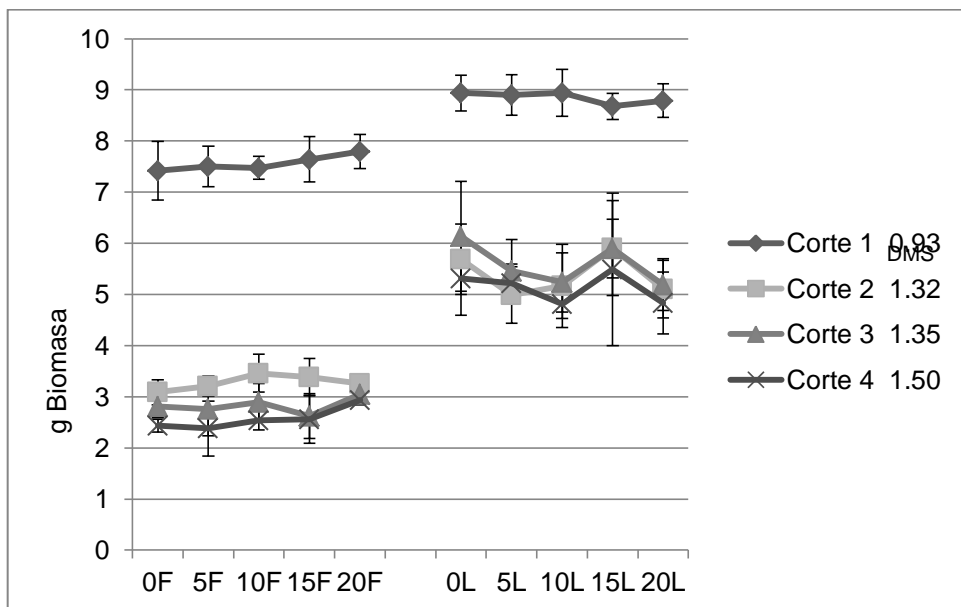
experimento. El análisis de la biomasa acumulada de los cuatro cortes separa los tratamientos en dos grupos: los que usaron biocarbón con lombricomposta como

los mejores y los que emplearon biocarbón con fertilización química (Cuadro 4.5).



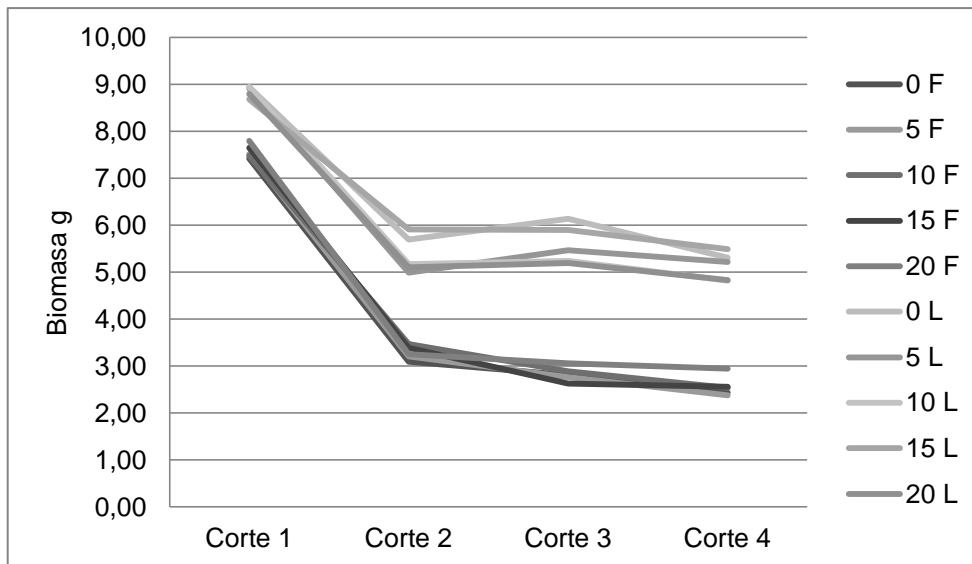
Nota: 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.1. Biomasa acumulada de los cuatro cortes biocarbón < 4 mm y T 300°C.



Nota: 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.2. Biomasa aérea seca de cuatro cortes con biocarbón <4 mm y T 300°C.

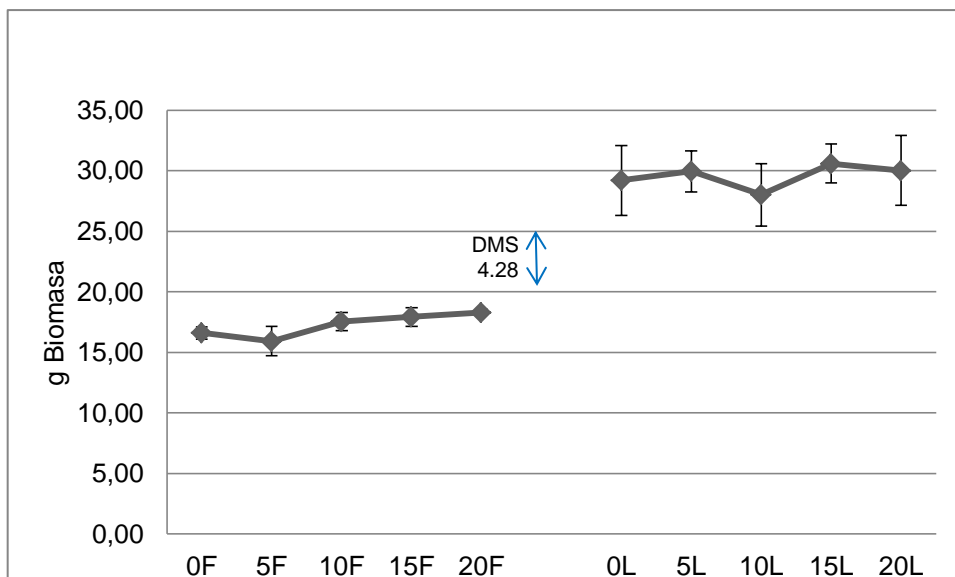


Nota: 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.3. Dinámica de la biomasa aérea por cortes con biocarbón <4 mm y T 300°C.

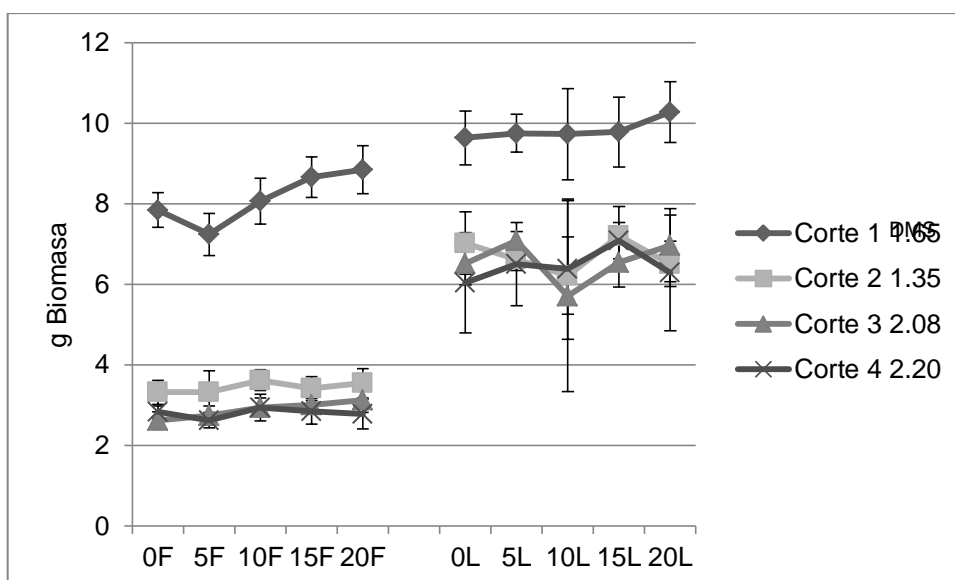
Biocarbón > 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 2)

Con este biocarbón no se presentaron de manera general diferencias significativas en producción de biomasa acumulada por efecto del biocarbón en sus diferentes dosis, pero hubo una marcada diferencia entre los tratamientos con fertilización química y los que emplearon lombricomposta. Estos últimos exhibieron mayor rendimiento acumulado que los primeros (Cuadro 4.5, Figura 4.4). En la Figura 4.5 se muestran las medias y desviaciones estándares de los cuatro cortes cuando se usó el biocarbón > 4mm y T 650 °C, donde se distingue la tendencia en la producción de biomasa con fertilizante químico y lombricomposta en cada corte. La biomasa producida en cada corte fue independiente de las dosis de biocarbón cuando fue usada la lombricomposta, pero con fertilización química los tratamientos con 15 y 20 ton ha⁻¹ resultaron con las mayores biomazas.



Nota: 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.4. Biomasa acumulada de los cuatro cortes biocarbón > 4 mm y T 650°C.



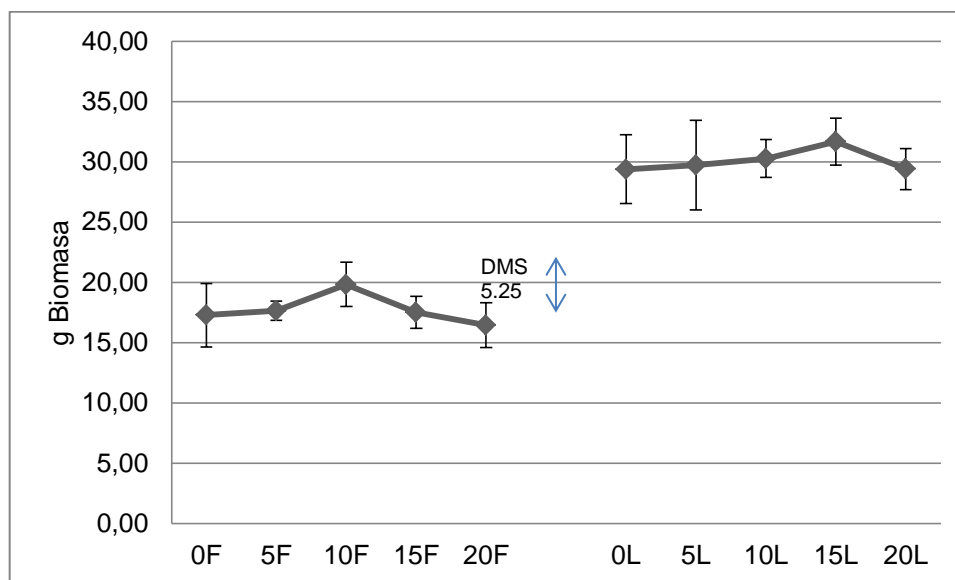
Nota: 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.5. Biomasa aérea seca de cuatro cortes, biocarbón > 4 mm y T 650°C.

Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original y T 650°C (Experimento 3)

La biomasa acumulada con el biocarbón < 4 mm y T 650 °C no presentó diferencias significativas entre los tratamientos en función de las dosis de biocarbón empleadas. Los valores medios de biomasa y las desviaciones

estándares se muestran en el Cuadro 4.5. También en este ensayo es notoria la diferencia entre los tratamientos que usaron fertilización química y los que emplearon lombricomposta (Figura 4.6), estos últimos con mayor biomasa. Se observa además, el efecto depresivo en biomasa del tratamiento con fertilización química y 20 ton ha⁻¹ de biocarbón.

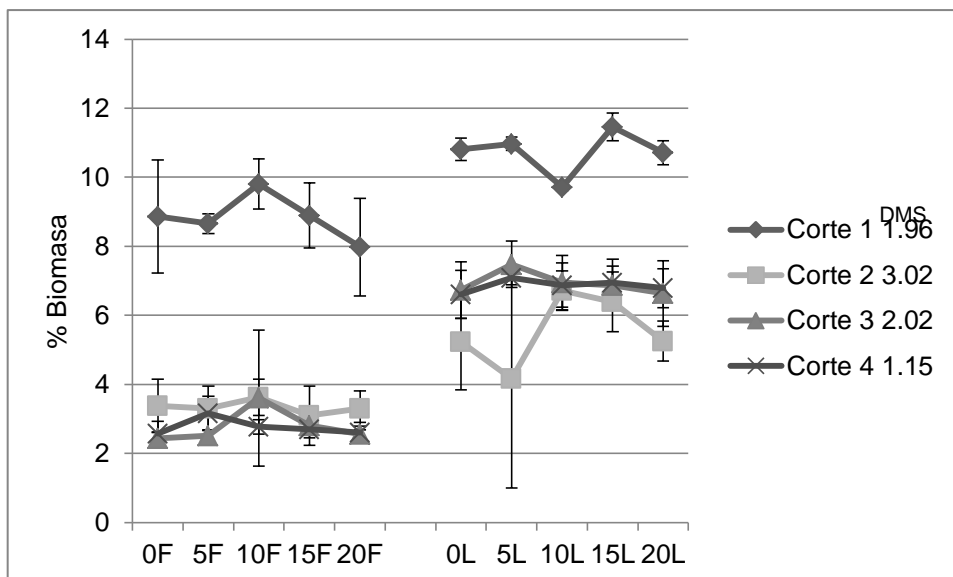


Nota: 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.6. Acumulado de biomasa cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 650°C.

En el comparativo de los cortes (Figura 4.7), se observa la dinámica que tuvo la biomasa, donde el corte uno fue el que presentó los mayores valores, y hubo una disminución de los pesos secos en los subsiguientes cortes, similar a los anteriores biocarbones. Aquí se muestra que las diferencias entre los tratamientos con lombricomposta y fertilización química fueron menos marcadas que en los otros experimentos.

Puede suponerse que estos resultados son debidos al efecto de la lombricomposta, y no a las dosis de biocarbón. Lehmann *et al.* (2003) afirmaron que no hay información al respecto.



Nota: 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.7. Biomasa de cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T, 650°C.

La baja respuesta a la fertilización química con biocarbón observada en los tres experimentos es contrario a lo definido por McClellan *et al.* (2007) quienes sí obtuvieron un aumento de la biomasa con uso de biocarbón y fertilizante químico. Sin embargo, en su trabajo no contrastaron el uso de abono orgánico. De la misma manera Wang *et al.* (2012) obtuvieron altas biomásas con biocarbón y fertilización química. Por su parte Oguntunde *et al.* (2007), también presentó incrementos en biomasa por el uso de biocarbón en maíz en un 44 %, cuando lo sembraron en suelos donde se había elaborado biocarbón y quedaron residuos del mismo, y con el uso de fertilizante químico. Lehamnn *et al.* (2003) obtuvieron incrementos en biomasa de frijol (*Vigna unguiculata* (L.)Walp.) y arroz (*Oryza sativa* L.) en un Antrosol fímico en la Amazonia, que contenía carbón negro, con fertilización química.

Porcentaje de nitrógeno en la parte aérea

Las concentraciones de este nutriente presentó diferencias significativas en los tres experimentos en algunos cortes, pero en otros no se manifestó el efecto de los tratamientos. En el Cuadro 2 del Anexo 1 se presentan los valores porcentuales de nitrógeno en cada experimento.

En el Cuadro 4.6 se muestran las medias y las desviaciones estándares de los contenidos de nitrógeno en cada experimento y corte.

Cuadro 4.6. Medias y desviaciones estándares de nitrógeno, tres biocarbones.

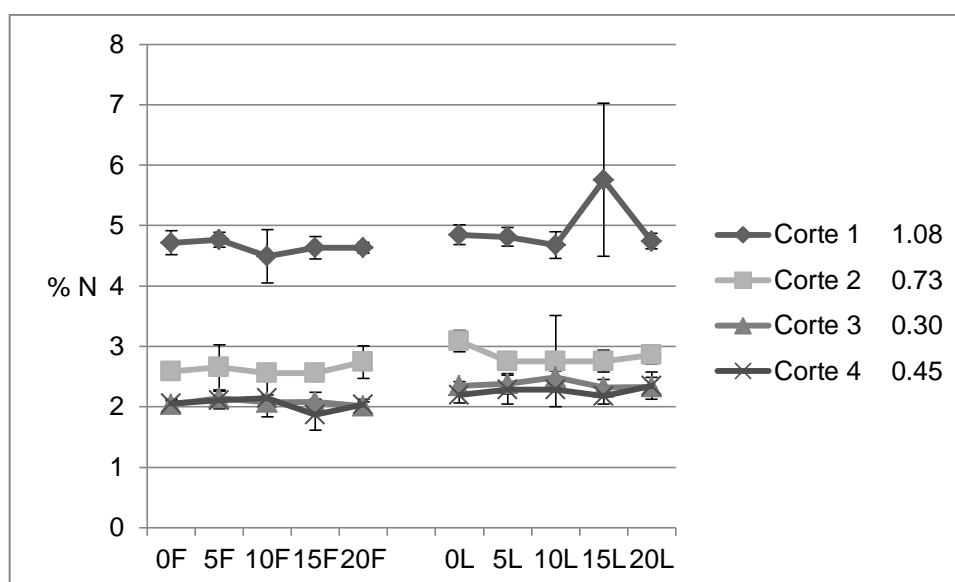
Experimento 1 (Biocarbón < 4 mm y T 300°C)								
Do-sis	Nitrógeno 1		Nitrógeno 2		Nitrógeno 3		Nitrógeno 4	
	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV
0F	4.71±0.19ab	4.2	2.58±0.09	3.7	2.04±0.05de	2.7	2.05±0.07ab	3.6
5F	4.76±0.12ab	2.6	2.65±0.37	14.2	2.14±0.12bcde	6.0	2.10±0.14ab	6.8
10F	4.48±0.44b	9.9	2.56±0.09	3.6	2.07±0.12cde	6.1	2.14±0.31ab	14.6
15F	4.63±0.18b	4.0	2.56±0.07	2.7	2.08±0.15bcde	7.5	1.87±0.25b	13.8
20F	4.63±0.08b	1.9	2.74±0.26	9.8	2.01±0.07e	3.5	2.03±0.09ab	4.7
0L	4.84±0.16ab	3.4	3.08±0.17	5.6	2.34±0.07abc	3.0	2.20±0.13ab	6.3
5L	4.81±0.15ab	3.2	2.75±0.13	4.7	2.38±0.16ab	7.0	2.28±0.23ab	10.4
10L	4.67±0.21ab	4.7	2.53±0.75	29.7	2.48±0.10a	4.3	2.28±0.03ab	1.7
15L	5.75±1.26a	22.0	2.85±0.18	6.4	2.31±0.13abcd	5.7	2.18±0.13ab	6.2
20L	4.74±0.13ab	2.8	2.86±0.15	5.4	2.33±0.15abcd	6.6	2.34±0.22a	9.6
Experimento 2 (Biocarbón > 4 mm y T 650°C)								
0F	4.65±0.08abc	1.7	2.40±0.41cd	17.1	1.93±0.07	17	1.89±0.05	2.6
5F	4.63±0.12abc	2.6	2.60±0.13abcd	5.0	1.98±0.08	5.0	2.10±0.08	3.8
10F	4.54±0.04bcd	0.9	2.43±0.08bcd	3.3	2.14±0.34	3.3	2.09±0.06	2.9
15F	4.48±0.17cd	3.8	2.54±0.16abcd	6.3	1.97±0.07	6.3	2.11±0.26	12.3
20F	4.33±0.19d	4.4	2.33±0.12d	5.1	1.91±0.09	5.1	2.01±0.17	8.5
0L	4.82±0.16ab	3.3	2.91±0.19abc	6.5	2.18±0.05	6.5	1.91±0.24	12.6
5L	4.88±0.04a	0.8	3.04±0.27a	8.9	2.19±0.13	8.9	2.16±0.22	10.2
10L	4.84±0.10a	2.1	3.03±0.07a	2.3	2.28±0.17	2.3	2.31±0.23	10.0
15L	4.88±0.08a	1.6	3.00±0.35ab	11.7	2.33±0.18	11.7	2.18±0.18	8.3
20L	4.81±0.07ab	1.5	3.05±0.28a	9.2	2.29±0.25	9.2	1.80±0.72	40.0
Experimento 3 (Biocarbón < 4 mm y T 650°C)								
0F	4.67±0.09	1.9	2.49±0.16cd	6.4	2.04±0.04bc	2.0	1.93±0.09	4.7
5F	4.26±0.40	9.4	2.56±0.26bcd	10.2	2.08±0.09bc	4.3	1.79±0.03	1.7
10F	4.31±0.17	3.9	2.51±0.14cd	5.6	2.03±0.04c	2.0	1.79±0.12	6.7
15F	4.32±0.17	3.9	2.51±0.17cd	6.8	2.05±0.11bc	5.4	1.87±0.10	5.3
20F	4.38±0.16	3.6	2.46±0.12d	4.88	1.98±0.07c	3.5	1.85±0.07	3.8
0L	4.37±0.80	18.3	3.07±0.34ab	11.1	2.35±0.15a	6.4	1.77±0.54	30.5
5L	4.78±0.23	4.8	3.00±0.13abc	4.3	2.28±0.08ab	3.5	1.97±0.10	5.1
10L	4.81±0.17	3.5	3.21±0.24a	7.5	2.18±0.13abc	6.0	1.93±0.14	7.2
15L	4.75±0.12	2.5	2.97±0.14abcd	4.7	2.36±0.14a	5.9	1.93±0.05	2.6
20L	4.69±0.24	5.1	2.91±0.30abcd	10.3	2.38±0.07a	2.9	2.06±0.04	1.9

Nota 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Biocarbón < 4 mm de partícula de biomasa original, T 300°C (Experimento 1)

El análisis de las concentraciones de nitrógeno en la biomasa aérea con el biocarbón (< 4mm, T 300°C) mostró diferencias significativas entre los tratamientos con fertilización química y los que usaron lombricomposta independientemente de las dosis del biocarbón (Cuadro 4.6).

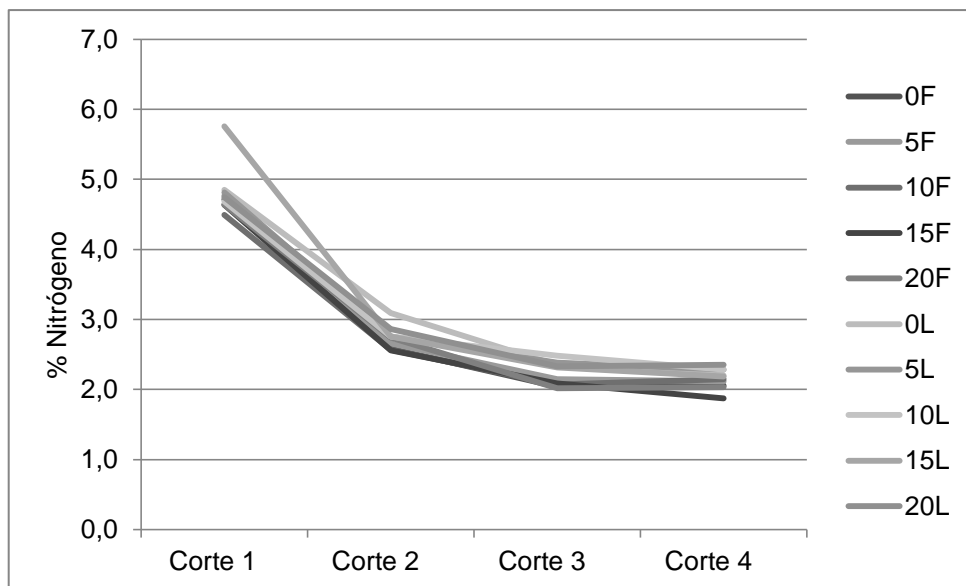
El análisis de los cuatro cortes (Figura 4.8) muestra la diferencia entre los tratamientos que usaron fertilización química y la lombricomposta, siendo éstos últimos los que presentaron mayores concentraciones.



Nota 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.8. Medias de concentración de nitrógeno, cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C.

En la dinámica de nitrógeno en el tejido vegetal durante el experimento (Figura 4.9) se observa que disminuyeron fuertemente del corte uno al cuatro, tendencia general en todos los ensayos (Cuadro 4.6).



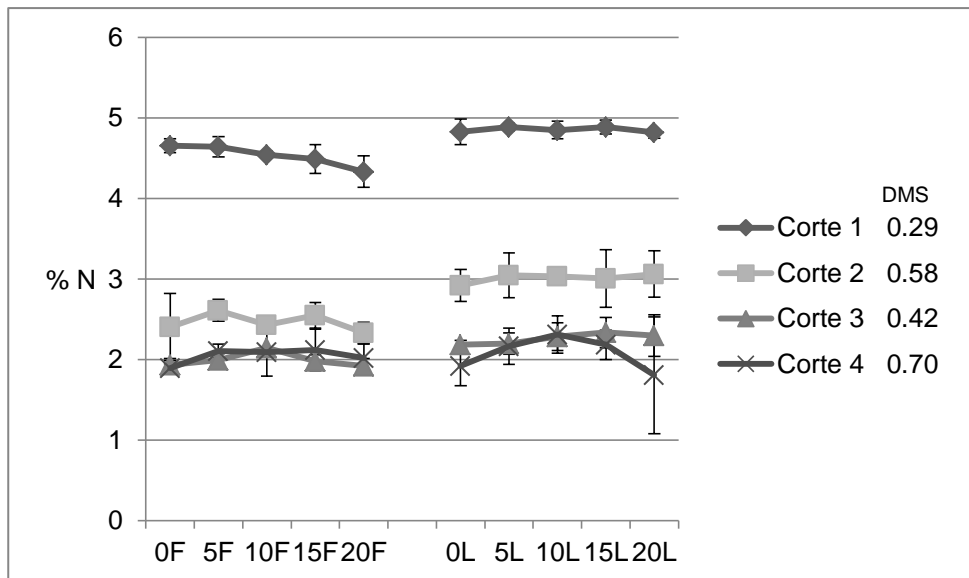
Nota 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.9. Dinámica del nitrógeno por cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C.

Biocarbón > 4 mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 2)

El análisis estadístico de la concentración de nitrógeno con el biocarbón > 4 mm, T 650° C (Cuadro 4.6) mostró diferencias solo en los dos primeros cortes, donde se observa que los tratamientos con diferentes dosis de biocarbón con lombricomposta y los que emplearon biocarbón con fertilizante químico son diferentes (Figura 4.10). Los que tienen mayor concentración de este nutriente son los que emplean lombricomposta. Esto significa que la respuesta fue independiente de las dosis de biocarbón empleadas.

Las concentraciones de este nutriente con fertilización química en el corte uno variaron al aumentar la dosis de biocarbón, con una disminución en dicha concentración de nitrógeno, de tal manera que existe diferencia estadística entre los tratamientos con lombricomposta y el tratamiento con 20 ton ha⁻¹ con fertilizante químico el cual presentó los valores más bajos. Esto no sucedió en los cortes sucesivos ni en los tratamientos con lombricomposta.



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

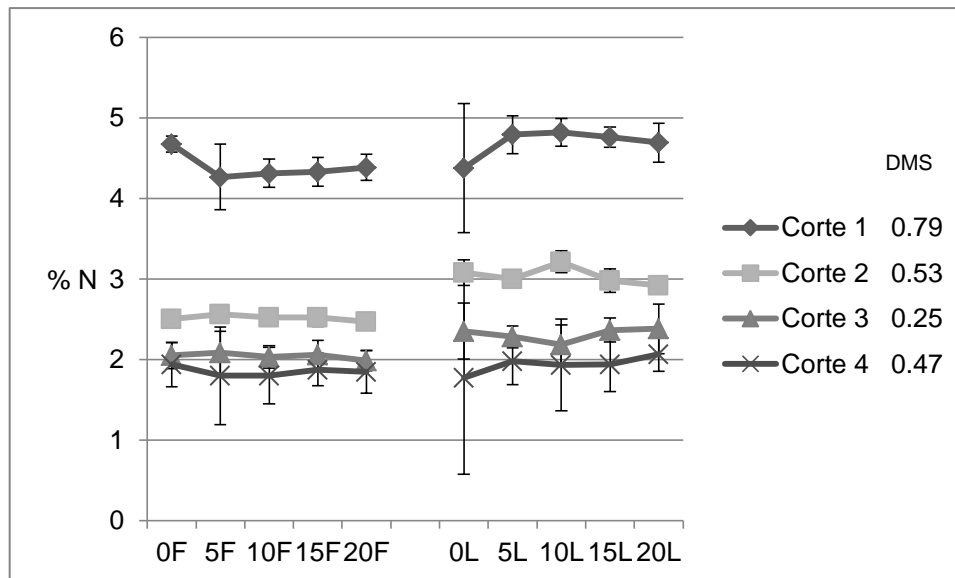
Figura 4.10. Nitrógeno de cuatro cortes, biocarbón > 4 mm y T 650°C.

Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 3)

En este experimento (biocarbón < 4 mm, T 650°C), el análisis de varianza mostró diferencias significativas solo en dos cortes, entre los tratamientos con lombricomposta y con fertilización química, independientemente de las dosis del biocarbón empleadas (Cuadro 4.6).

Se observa nuevamente la diferencia estadística con el tratamiento de 20 ton ha⁻¹ con fertilizante químico que presentó las menores concentraciones de este nutriente.

En los cuatro cortes se repite la tendencia de disminución de concentración de nitrógeno en cada corte con respecto a los anteriores biocarbones (Figura 4.11).



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.11. Nitrógeno de cuatro cortes, biocarbón < 4mm, T 650°C.

Las concentraciones de nitrógeno en los tres ensayos en un inicio estuvieron en un valor alto según Guerrero (1998), quien reportó concentraciones en biomasa aérea de *L. perenne* entre 2.3 y 3.45 %; para el segundo corte, en un nivel normal y para los últimos, bajos, aun cuando no fue una limitante para el cultivo.

La tendencia de la disminución de la concentración de nitrógeno de uno a otro corte fue debida probablemente al alto número de plantas por maceta que tendió a disminuir dicha concentración en las mismas, como lo mencionó Schenkel (1971), quien consideró que a medida que aumentan los cortes sobrevienen deficiencias nutrimentales en el suelo. En este caso, el suelo presentó bajo contenido de nitrógeno y materia orgánica, así como de bases cambiables. Aún cuando no fueron visibles sintomatologías de deficiencias nutricionales en las plantas, es cierto que la competencia nutrimental entre ellas fue importante. Además debe ser considerada la fertilización nitrogenada en el riego que se realizó cada semana que no permitió que hubiese un déficit de este nutriente, que se hubiese reflejado en sintomatología en la planta.

El resultado obtenido que los mejores tratamientos han sido los de biocarbón con uso de lombricomposta, coincide con los resultados de Ngo *et al.* (2013), quienes encontraron un efecto positivo del uso de estos dos productos juntos en el contenido de nitrógeno foliar.

Fósforo.

En el Cuadro 3 del Anexo 1 se presentan las concentraciones de fósforo de los tres experimentos en sus cuatro cortes. En el Cuadro 4.7 se muestran las medias y desviaciones estándares de las mismas.

El contenido de este nutriente en los diferentes experimentos y tratamientos presentó gran variabilidad, pero con muy altos valores.

Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, T 300°C (Experimento 1)

El análisis estadístico de fósforo con biocarbón < 4 mm y T 300°C presentó diferencias significativas en los cortes uno y dos, no así en el tres y cuatro donde no hubo diferencia estadística. En el corte uno los mejores tratamientos fueron el de 5 y 20 ton ha⁻¹ con fertilización química, con diferencia estadística con los tratamientos de 10 y 20 ton ha⁻¹ con lombricomposta (Cuadro 4.7, Figura 4.12).

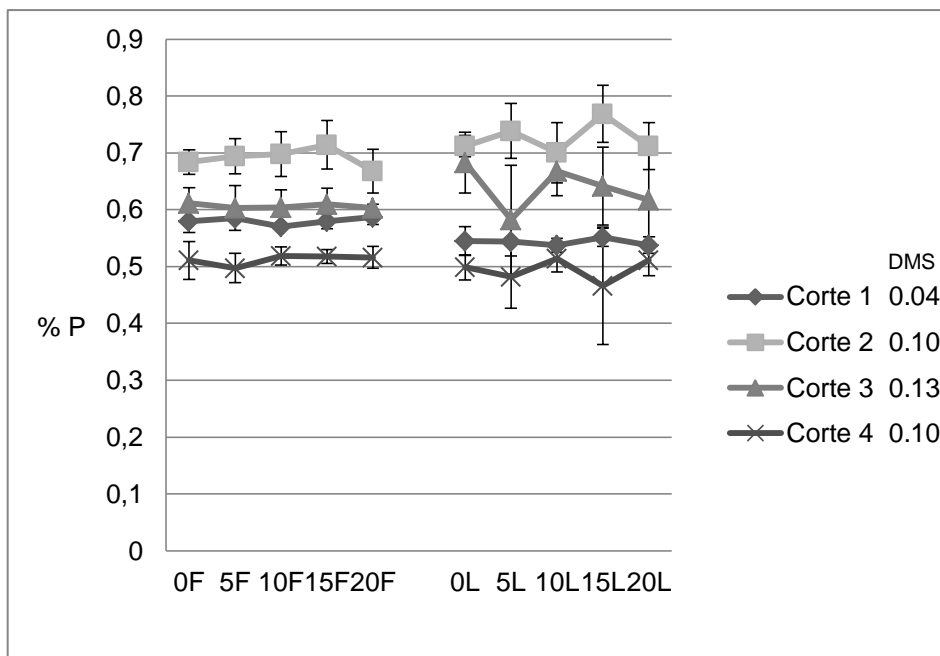
En el corte dos el mejor tratamiento resultó el de 15 ton ha⁻¹ con lombricomposta, con diferencias estadísticas con el tratamiento de 20 ton ha⁻¹ con fertilizante químico (Cuadro 4.7), el cual presentó las menores concentraciones de este nutriente (Figura 4.12).

La concentración de fósforo en los cuatro cortes varió, el corte dos presentó los mayores valores, siguiendo el tres, uno y cuatro respectivamente (Figura 4.13).

Cuadro 4.7. Medias, desviaciones estándares y significancia de fósforo de los tres Experimentos.

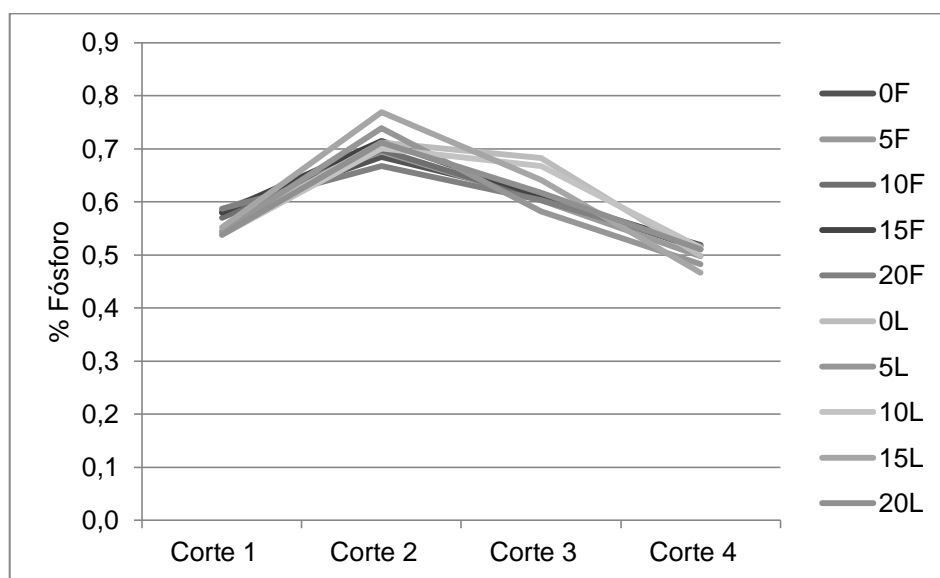
Experimento 1 (Biocarbón < 4 mm y T 300°C)								
Do-sis	Corte 1		Corte 2		Corte 3		Corte 4	
	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV
0F	0.58±0.02ab	3.48	0.68±0.02ab	3.14	0.61±0.03	4.587	0.51±0.03	6.49
5F	0.59±0.01a	1.05	0.69±0.004ab	4.46	0.60±0.04	6.526	0.50±0.03	5.17
10F	0.57±0.003abc	0.47	0.70±0.04ab	5.64	0.60±0.03	5.025	0.52±0.02	3.07
15F	0.58±0.01ab	2.29	0.71±0.04ab	6.00	0.61±0.03	4.612	0.52±0.01	2.32
20F	0.59±0.01a	2.27	0.67±0.04b	5.73	0.60±0.007	1.152	0.52±0.02	3.68
0L	0.55±0.03bc	4.62	0.71±0.02ab	2.68	0.68±0.05	7.838	0.50±0.02	4.46
5L	0.54±0.02bc	4.58	0.74±0.05ab	6.53	0.58±0.10	16.418	0.48±0.06	11.55
10L	0.54±0.01bc	2.33	0.70±0.05ab	7.62	0.67±0.04	6.438	0.51±0.02	4.47
15L	0.55±0.02abc	2.92	0.77±0.05a	6.54	0.64±0.07	10.685	0.47±0.10	22.09
20L	0.54±0.01c	2.72	0.71±0.04ab	5.83	0.62±0.08	12.888	0.51±0.02	5.29
Experimento 2 (Biocarbón > 4 mm y T 650°C)								
0F	0.57±0.02abc	3.2	0.69±0.02	2.3	0.56±0.01ab	1.0	0.51±0.02ab	3.6
5F	0.59±0.01ab	2.0	0.67±0.02	2.9	0.58±0.04ab	6.4	0.51±0.02ab	3.6
10F	0.56±0.05abc	9.0	0.66±0.03	5.2	0.56±0.03ab	4.7	0.49±0.01b	2.7
15F	0.58±0.03abc	4.8	0.66±0.02	3.0	0.57±0.03ab	4.9	0.52±0.02ab	4.2
20F	0.60±0.01a	2.3	0.67±0.03	4.6	0.53±0.01b	2.4	0.49±0.01b	1.5
0L	0.55±0.01abc	1.7	0.71±0.05	7.5	0.66±0.08a	11.8	0.50±0.01ab	2.2
5L	0.54±0.02abc	3.0	0.68±0.05	7.6	0.62±0.01ab	1.5	0.53±0.02ab	3.4
10L	0.55±0.04abc	7.4	0.73±0.04	4.8	0.63±0.07ab	11.6	0.52±0.02ab	3.9
15L	0.52±0.02c	4.2	0.74±0.06	8.0	0.57±0.06ab	9.8	0.53±0.02a	3.0
20L	0.53±0.02bc	3.7	0.70±0.04	6.4	0.61±0.03ab	4.8	0.51±0.01ab	2.8
Experimento 3 Biocarbón < 4 mm y T 650°C								
0F	0.58±0.02b	2.60	0.66±0.04b	5.9	0.48±0.03ab	6.0	0.53±0.02	3.9
5F	0.52±0.13b	24.5	0.69±0.02ab	3.3	0.49±0.03ab	5.7	0.53±0.02	4.4
10F	0.57±0.02b	3.8	0.70±0.02ab	2.6	0.48±0.04ab	8.2	0.52±0.01	1.8
15F	0.51±0.12b	23.5	0.64±0.03b	5.0	0.39±0.10b	24.6	0.52±0.02	4.1
20F	0.56±0.01b	2.2	0.66±0.03b	5.2	0.49±0.01ab	3.1	0.53±0.07	12.9
0L	0.48±0.11b	22.2	0.72±0.08ab	10.5	0.54±0.02a	3.2	0.50±0.00	0.1
5L	0.49±0.13b	26.8	0.73±0.04ab	5.4	0.53±0.04a	7.2	0.54±0.01	2.7
10L	0.52±0.03b	5.4	0.71±0.05ab	7.2	0.52±0.02a	4.7	0.53±0.03	5.7
15L	0.51±0.02b	4.6	0.72±0.04ab	5.1	0.56±0.03a	5.3	0.57±0.05	8.7
20L	0.88±0.005a	0.5	0.78±0.03a	4.3	0.54±0.04a	6.8	0.57±0.02	3.6

Nota 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.12. Fósforo de cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C.



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.13. Dinámica de fósforo por cortes, biocarbón < 4 mm y T 300°C.

Biocarbón > 4 mm de partícula de biomasa original, T 650°C (Experimento 2)

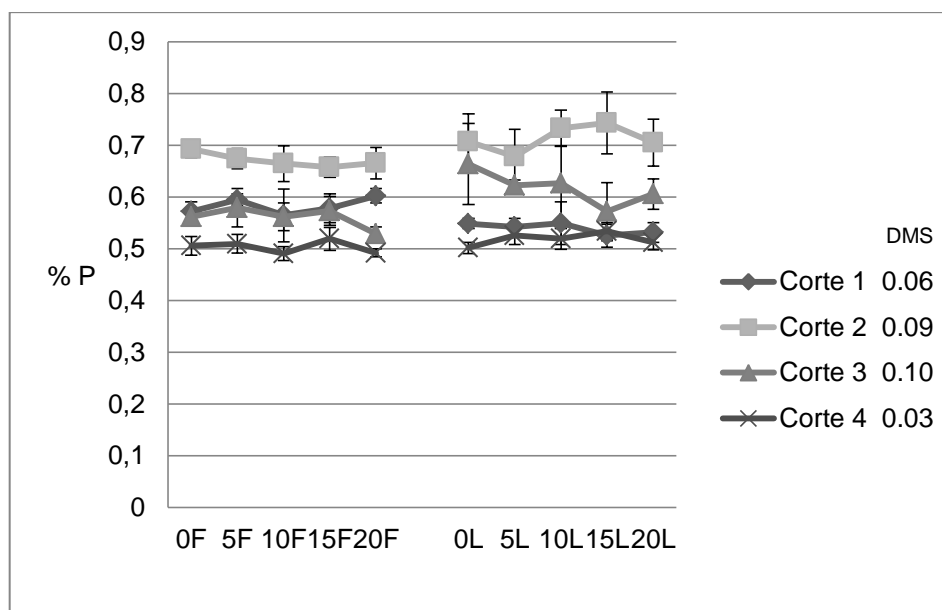
En este experimento las diferencias significativas se presentaron en los cortes uno, tres y cuatro (Cuadro 4.7), mientras que el corte dos no tuvo diferencias estadísticas.

En el corte uno el mejor tratamiento fue el de 20 ton ha⁻¹ con fertilización química con diferencia estadística con el tratamiento de 15 ton ha⁻¹ con lombricomposta que presentó la media más baja (Figura 4.15). Probablemente pudo haber sido un efecto del biocarbón con el fertilizante químico como lo afirmaron Lehmann *et al.* (2002).

En el corte tres el tratamiento con más alta concentración de fósforo fue el control (0 biocarbón) con lombricomposta y diferente estadísticamente al tratamiento de 20 ton ha⁻¹ con fertilización química que es el de menor concentración de fósforo.

El análisis estadístico del corte cuatro arrojó que el mejor tratamiento fue el de 15 ton ha⁻¹ con lombricomposta y diferencia estadística con los tratamientos de 10 y 20 ton ha⁻¹ con fertilización química, los cuales presentaron las concentraciones más bajas de este nutriente.

La concentración de fósforo de los cuatro cortes de este experimento mostró la misma tendencia y las mayores concentraciones las tuvo el corte dos, mientras que el corte tres fue el siguiente con valores un poco superiores a los tratamientos del corte uno. El corte cuatro presentó las menores concentraciones de este elemento.



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.14. Fósforo de cuatro cortes biocarbón > 4 mm y T 650°C.

El comportamiento de las concentraciones de fósforo en los cuatro cortes fue similar al observado con el biocarbón anterior, por lo que descendieron del corte dos, al tres, uno y cuatro, respectivamente.

**Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C
(Experimento 3)**

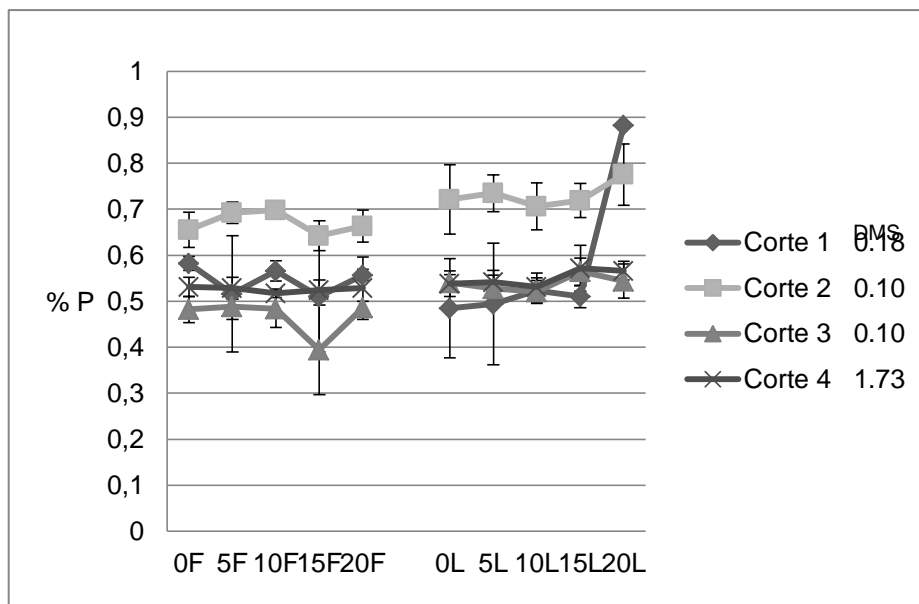
El análisis estadístico de la concentración de fósforo en los cuatro cortes (Cuadro 4.7) mostró diferencias significativas en los cortes uno, dos y tres.

En el corte uno (Figura 4.15) el mejor tratamiento fue el de 20 ton ha⁻¹ con lombricomposta, con los valores más altos de todos los cortes, que se podría suponer pueda ser debido a un efecto conjunto del biocarbón a altas dosis con la lombricomposta, sin embargo Lehmann (2003) aseguró que no hay información disponible acerca del efecto de las aplicaciones de biocarbón junto con aplicaciones orgánicas. Existió diferencia estadística del tratamiento señalado con los demás tratamientos tanto de lombricomposta como con fertilización química los que presentaron menores valores y con igualdad estadística entre ellos.

También en el corte dos el mejor tratamiento fue el de 20 ton ha⁻¹ con lombricomposta, con una diferencia estadística con los tratamientos de 0, 15 y 20 ton ha⁻¹ con fertilización química.

En el corte tres las mayores concentraciones las presentaron todos los tratamientos con lombricomposta con diferencia estadística con el tratamiento de 15 ton ha⁻¹ con fertilización química.

Los contenidos de fósforo durante el experimento variaron en los cuatro cortes y el corte dos presentó los valores mayores, los otros cortes exhibieron valores menores y muy parecidos entre sí (Figura 4.15).



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.15. Fósforo de cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 650°C.

Los resultados obtenidos de la respuesta de fósforo en el cultivo puede pensarse que fueron debidas al efecto del biocarbón que produjo mayor eficiencia en el uso del fertilizante o porque este producto le cedió fósforo al suelo como mencionaron Lehmann *et al.* (2002). Atkinson y Fitzgerald (2010) también aseguraron que el biocarbón puede tener efectos indirectos en la disponibilidad y consumo de fósforo a través de los cambios realizados por microorganismos en el ambiente del suelo.

Además, Guerrero (1998) consignó valores promedio de 0.43 % de fósforo en biomasa aérea para *Lolium perenne*, y todos los contenidos en todos los tratamientos y cortes son mayores a este valor. Lehmann *et al.* (2002) concluyeron en una investigación de aplicación de biocarbón en arroz y jinicuil (*Inga edulis* Mart.) que las adiciones de biocarbón tuvieron un efecto positivo en la nutrición de fósforo, potasio y posiblemente cobre en un Ferralsol xántico y un Antrosol fímico. Mencionaron además, que si se aplicaba fertilizante junto con el biocarbón, algunos nutrientes mostraban una eficiencia de consumo más alta.

Sin embargo, hay que observar que la respuesta a los tratamientos en la concentración de fósforo varió en los diferentes biocarbones, el de < 4 mm y T 300° C mostró respuesta al biocarbón con fertilizante químico en el corte uno y ya en el dos fue con biocarbón y lombricomposta. El biocarbón > 4 mm y T 650° C

tuvo una respuesta parecida al mostrar respuesta en un inicio al biocarbón con fertilizante químico, en el corte tres sólo a la aplicación de lombricomposta y finalmente en el corte cuatro al biocarbón con lombricomposta. El biocarbón < 4 mm y T 650°C en todos los cortes tuvo respuesta con el biocarbón con lombricomposta, pero en los dos primeros fue la más alta dosis de biocarbón. En el último fue independiente de las dosis de biocarbón.

Esto hace suponer que en los dos primeros biocarbones sí hubo un efecto de la aplicación de fertilizante químico con el biocarbón, mientras que en el tercero sólo fue la lombricomposta y probablemente una posible disponibilidad de nutrientes para las plantas de esta última al avanzar el experimento.

Con respecto a la mayor concentración de fósforo en el segundo corte, se debió probablemente al aumento de la colonización del volumen de suelo por las raíces y posterior decaimiento de esta.

Potasio.

En el Cuadro 3 del Anexo 1 se presentan los datos de concentraciones de potasio con los tres biocarbones en los cuatro cortes. En el Cuadro 4.8 se presentan las medias, desviaciones estándares y significancia del análisis de varianza. Este elemento es el que presentó poca respuesta a los tratamientos y existió diferencia significativa únicamente con el biocarbón < 4 mm y T 300° C, corte tres, y con el biocarbón < 4 mm y T 650° C, cortes tres y cuatro.

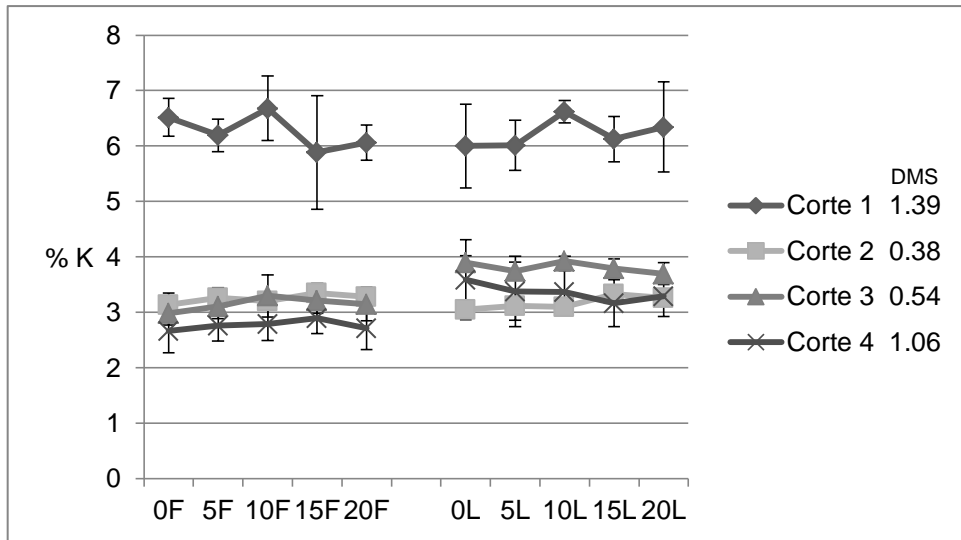
Biocarbón <4mm de partícula de biomasa original, T 300°C (Experimento 1)

Con este biocarbón hubo diferencia significativa entre los tratamientos en el corte tres (Figura 4.16 y Cuadro 4.8) donde los mejores fueron con el uso de lombricomposta con dosis de biocarbón de 10 ton ha⁻¹ y el control (suelo sin biocarbón), que son estadísticamente diferentes a los tratamientos con 0, 5 y 20 ton ha⁻¹ de biocarbón y fertilización química.

Cuadro 4.8. Medias de la concentración de potasio en los tres experimentos

Experimento 1 (Biocarbón < 4 mm y T 300°C)								
Dosis	Corte 1		Corte 2		Corte 3		Corte 4	
	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV	$\bar{X} \pm DE$	CV
0F	4.25±0.43	10.1	2.88±0.18	6.4	2.80±0.12d	4.3	2.30±0.26	11.3
5F	4.10±0.67	16.4	3.16±0.31	9.7	2.85±0.26d	9.1	2.35±0.11	4.8
10F	4.44±0.24	5.5	2.94±0.38	12.9	2.78±0.09bcd	3.2	2.27±0.18	7.8
15F	4.20±0.41	9.8	2.60±0.15	5.9	2.95±0.29cd	9.9	2.43±0.18	7.46
20F	4.34±0.37	8.5	2.71±0.40	14.8	2.65±0.04d	1.5	2.24±0.13	6.0
0L	4.24±0.51	12.1	2.97±0.24	8.0	3.15±0.11a	3.4	2.80±0.24	8.6
5L	3.91±0.44	11.2	2.90±0.03	1.1	3.24±0.22abc	6.9	2.83±0.42	14.9
10L	4.23±0.35	8.2	2.80±0.24	8.6	3.14±0.09a	2.8	2.82±0.28	9.9
15L	3.68±0.46	12.6	2.64±20.20	20.2	3.02±0.19ab	6.4	2.67±0.18	6.8
20L	4.02±0.63	15.6	3.23±3.49	3.5	3.10±0.11abc	3.4	2.80±0.18	7.5
Experimento 2 (Biocarbón > 4 mm y T 650°C)								
0F	4.20±0.22	5.2	3.04±0.36	11.8	2.57±0.42	16.3	2.48±0.27	10.9
5F	4.60±0.51	11.1	3.12±0.31	9.9	2.91±0.23	7.9	2.55±0.12	4.7
10F	4.52±0.48	10.6	2.87±0.37	12.9	2.74±0.13	4.7	2.49±0.16	6.4
15F	4.38±0.17	3.9	3.51±0.40	11.4	2.75±0.11	4.0	2.80±0.48	17.1
20F	4.48±0.42	9.4	3.77±1.33	35.3	2.83±0.35	12.4	2.61±0.26	10.0
0L	4.72±0.70	14.8	3.63±0.72	19.8	3.02±0.50	16.6	2.96±0.27	9.1
5L	4.72±0.61	12.9	2.90±0.41	14.1	3.24±0.38	11.7	2.99±0.15	5.0
10L	4.81±0.87	18.1	3.08±0.28	9.1	3.57±0.43	12.0	2.76±0.28	10.1
15L	4.41±0.41	9.3	2.99±0.37	12.4	3.64±1.15	31.6	2.83±0.07	2.5
20L	4.53±0.46	10.1	3.09±0.26	9.1	3.41±0.52	15.2	3.08±0.20	6.5
Experimento 3 Biocarbón < 4 mm y T 650°C								
0F	4.25±0.42	9.9	2.88±0.18	6.2	2.80±0.11bc	3.9	2.30±0.26ab	11.3
5F	4.10±0.67	16.3	3.16±0.30	9.5	2.85±0.25abc	8.8	2.35±0.11ab	4.7
10F	4.44±0.24	5.4	2.94±0.38	12.9	2.78±0.08bc	2.9	2.27±0.17ab	7.5
15F	4.20±0.41	9.8	2.60±0.15	5.8	2.95±0.29abc	9.8	2.43±0.18ab	7.4
20F	4.34±0.36	8.3	2.71±0.40	14.8	2.65±0.03c	1.1	2.24±0.13b	5.8
0L	4.24±0.51	12.0	2.97±0.23	7.7	3.15±0.10ab	3.2	2.80±0.24ab	8.6
5L	3.91±0.43	11.0	2.90±0.03	1.0	3.24±0.22a	6.8	2.83±0.42a	14.8
10L	4.23±0.34	8.0	2.80±0.24	8.6	3.14±0.08ab	2.5	2.82±0.27a	9.6
15L	3.68±0.46	12.5	2.64±0.53	20.1	3.02±0.19abc	6.3	2.67±0.18ab	6.7
20L	4.02±0.62	15.4	3.23±0.11	16.4	3.10±0.10ab	3.2	2.80±0.20ab	7.1

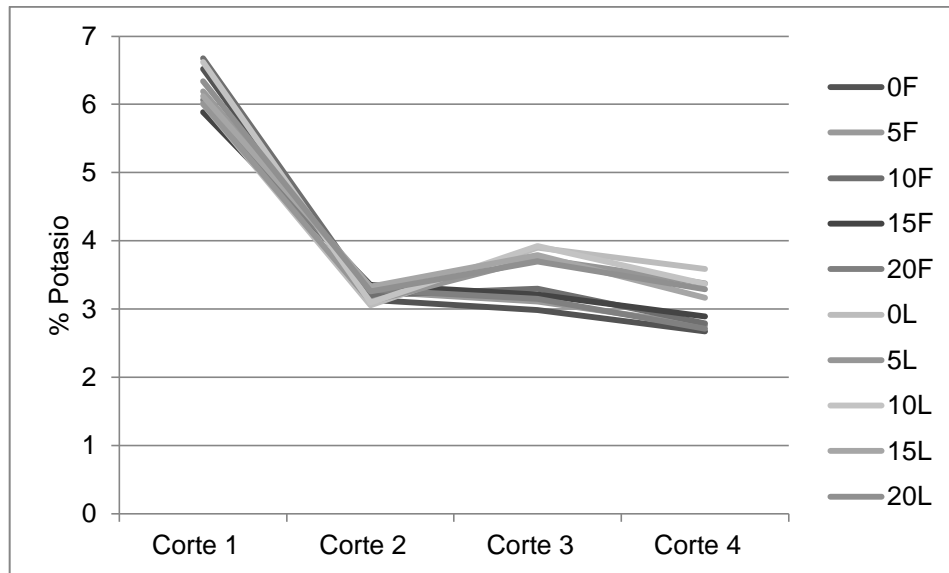
Nota 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.16. Potasio de cuatro cortes, biocarbón < 4 mm y T 300° C.

El comportamiento de las concentraciones de potasio conforme los cortes (Figura 4.17) define que hubo una disminución y una ligera diferencia en los tres últimos cortes

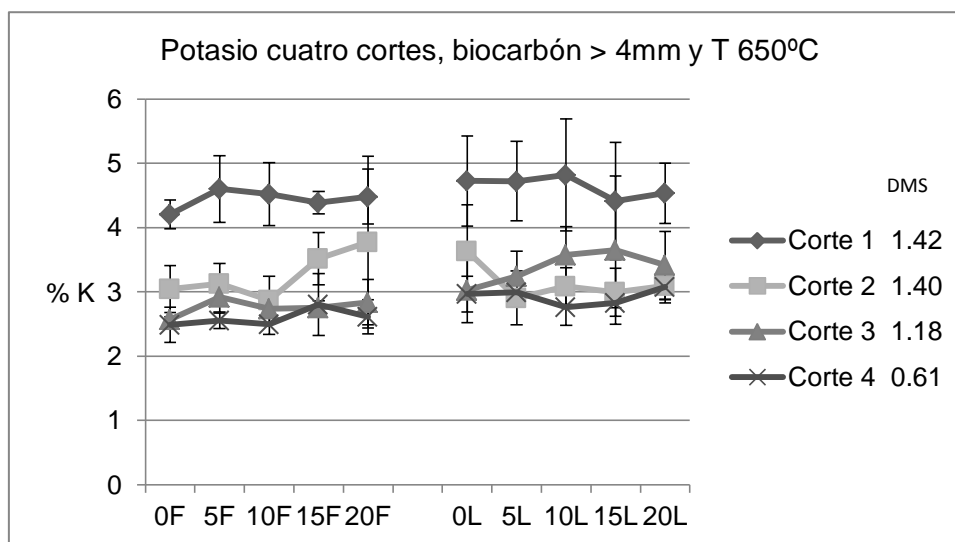


Nota 0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.17. Dinámica de potasio por cortes, biocarbón < 4 mm y T 300° C.

**Biocarbón > 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C
(Experimento 2)**

Todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales en todos los cortes (Figura 4.18).



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

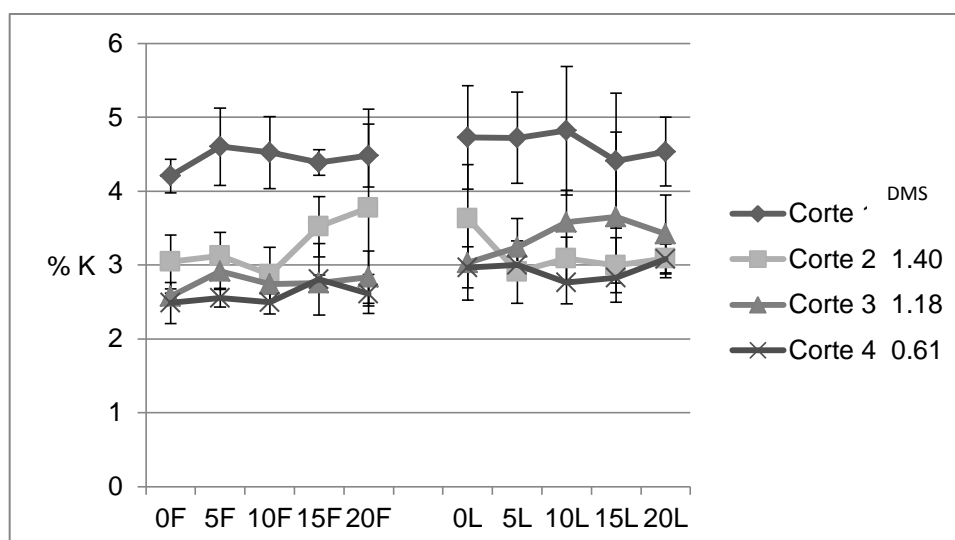
Figura 4.18. Potasio cuatro cortes, biocarbón > 4 mm y T 650°C.

**Biocarbón < 4mm de partícula de biomasa original, T 650°C
(Experimento 3)**

Con este biocarbón se presentaron diferencias estadísticas en los cortes tres y cuatro (Figura 4.19). Sin embargo, la tendencia general en estos cortes es que los tratamientos con lombricomposta tuvieron mayores concentraciones de este nutriente que los tratamientos con fertilización química sin un efecto marcado por las diferentes dosis de biocarbón.

Tales diferencias significativas mostraron que el mejor tratamiento en el corte tres fue con 5 ton ha⁻¹ con lombricomposta y diferente estadísticamente al tratamiento con 20 ton ha⁻¹ con fertilización química (Cuadro 4.8).

En el corte cuatro, el potasio tuvo las mayores concentraciones en los tratamientos de 5 y 10 ton ha⁻¹ de biocarbón con lombricomposta, con diferencia estadística con el tratamiento de 20 ton ha⁻¹ con fertilización química que presentó los valores más bajos (Cuadro 4.8, Figura 4.19).



0, 5, 10, 15 y 20 son ton ha⁻¹ equivalentes de biocarbón, F (fertilización química) y L (lombricomposta)

Figura 4.19. Potasio biocarbón < 4 mm y T 650°C, cuatro cortes.

La baja respuesta de los tratamientos en potasio pudo ser debida a que había suficiente cantidad de este nutriente para las necesidades del cultivo, ya que se fertilizó en un inicio con sulfato de potasio. Sohi (2009) afirmó que los biocarbones liberan potasio de sus cenizas y que podría estar disponible para las plantas, por lo que de ser así, no habría un déficit de este nutriente.

La concentración de este nutriente en todos los experimentos, en el corte uno, fue alta con respecto a lo definido por Guerrero (1998), quien mencionó un promedio de 3.92% para *Lolium perenne*. Los demás cortes de los tres experimentos presentaron contenidos menores de potasio al referido anteriormente, sin embargo, no hubo sintomatología de una deficiencia potásica. A este respecto, Steiner (2006) mencionó que podría haber lixiviación de potasio si se adicionaba cloruro de potasio como fertilizante. Aún cuando en este estudio lo que se usó fue sulfato de potasio, con una alta solubilidad, este investigador adujo en su investigación que las concentraciones obtenidas en su cultivo fueron debidas a que el biocarbón contenía potasio. Podría pensarse que como los biocarbones empleados contenían de 1-1.3%, sí podría haber un suministro de este nutriente por parte de ellos. En el caso de los tratamientos con lombricomposta podría haber habido una disponibilidad de potasio por parte de ella.

Raíces. De manera general, el desarrollo de raíces de *Lolium perenne* mostró que las más largas y profundas fueron las de los tratamientos de biocarbón con lombricomposta que llegaron a ocupar toda la maceta, como se ve en las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 con cada biocarbón, donde de manera general no se observó un efecto por las dosis del biocarbón.



Figura 4.20. Crecimiento de raíces de *Lolium perenne* con biocarbón < 4 mm y T 300° C



Figura 4.21. Crecimiento de raíces de *Lolium perenne* con biocarbón > 4 mm y T 650° C.



Figura 4.22. Crecimiento de raíces de *Lolium perenne* con biocarbón < 4 mm y T 650° C.

4.5 CONCLUSIONES

De la investigación realizada se pueden hacer las siguientes conclusiones:

En general, en todos los parámetros evaluados no hubo una respuesta como se esperaba a la adición de dosis crecientes de biocarbón.

La biomasa de *Lolium perenne* obtenida en este experimento no se relacionó con las dosis de biocarbón, sino con la fertilización con lombricomposta.

Las concentraciones de nitrógeno en biomasa aérea de *Lolium perenne* no estuvieron influenciadas por las dosis de biocarbón en los tres experimentos, además no se tuvo respuesta en todos los cortes y cuando la hubo estuvo relacionada con la aplicación de biocarbón y lombricomposta.

Las concentraciones de fósforo en un inicio estuvieron relacionadas con el uso de biocarbón y fertilizante químico, en los biocarbones < 4 mm y T 300° C y > 4 mm y T 650° C, pero en las últimas etapas al biocarbón con lombricomposta. En el biocarbón < 4 mm y T 650° C, la concentración de fósforo fue influenciada solo por el biocarbón con lombricomposta.

La respuesta a la aplicación de biocarbón con respecto a la concentración de potasio de biomasa aérea fue poco observada, sin una relación con las dosis de biocarbón.

El crecimiento de raíces observado fue mayor en los tratamientos con lombricomposta, sin una influencia propiamente de las dosis de biocarbón.

4.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, C.J. and Fitzgerald, J.D. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*. 337 (1-2): 1-18
<http://link.springer.com/article/10.1007/s11104-010-0464-5#page-1>. Enero 2011.
- Cox, J. and van Zwieten, L. 2012. Chapter Five. Use of biochar in crop production systems. In: *Biochar in horticulture. Prospects for the use of biochar in Australian horticulture*. Cox, J. ed. NSW Trade and Investment. Australia.
- Fong, E. 2011. Application of low-temperature produced biochar on plant growth in californian alfisol soil.
http://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2011final/FongE_2011.pdf. Junio de 2012.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G. and Zech, W.. 2001. The Terra Preta phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*. 88: 37-41.
- Guerrero, R.R. (ed.). 1998. Fertilización de cultivos en clima frío. Monómeros. Colombo Venezolanos, S.A. (E.M.A.). Colombia.
- Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M. and Bastos, A.C. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soil on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 144: 175-187.
- Lehmann, J. and Rondon, M. 2006. Bio-char soil management on highly-weathered soils in the humid tropics. In: *Biological Approaches to Sustainable Soils Systems* (Uphoff, N.T. ed.) CRC Press/Taylor & Francis. Boca Raton. pp. 517-530.
- Lehmann, J. and S. Joseph, eds. 2009. *Biochar: Environmental Management*. Earthscan. United Kingdom and United States.
- Lehmann, J., da Silva Jr., J.P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. and Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol in the Central Amazon basin: Fertiliser, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*. 249: 343-357.
- Lehmann, J., Da Silva, J.P., Rondon, M., Da Silva, C.M., Greenwodd, J., Thomas, N., Steiner, C. and Glaser, B. 2002. Slash and char: a feasible alternative for soil fertility management en the Central Amazon?. 17th WCSS. Thailand.

- McClellan, T., Deenik, J., Uehara, G., and Antal, M. 2007. Effects of flashed carbonized macadamia nutshell charcoal on plant and soil. Department of Tropical Plants and Soil Science, Hawaii Natural Energy Institute. http://www.ctahr.hawaii.edu/deenikj/Downloads/Tai_Charcoal_CTAHR_Sym_2007.pdf. Febrero 2011.
- McHenry, M. P. 2009. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129, 1-7.
- Ngo, P.T., Jouquet, P., Doan, T.T., Dan, D.K. and Rumpel, C. 2013. http://www.ramiran.net/doc13/Proceeding_2013/documents/S1.11..pdf. Septiembre 2013.
- Oguntunde, P.G., Fosu, M., Ajayi, A.E. and van de Giesen, N. 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biology and Fertility of Soils*. 39: 295-299.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. 2013. NotiFAO México. Boletín Informativo de la FAO en México No. 4. México.
- Richter, D.D., Jr. 2007. Humanity's transformation of earth's soil: Pedology's new frontier. *Soil Science*. 172:957–967
- Roberts, K. G., Lehmann, J., Gloy, B. A., Scott, N. R., and Joseph, S. 2010. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science and Technology*. 44: 827-833.
- Rondon, M., Lehmann, J., Ramàirez, J., and Hurtado, M. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils*, 43: 699-708.
- Schenkel, G. 1971. Evaluación de la fertilidad de un suelo, mediante la producción de materia seca en ensayos de macetas. I. Representaciones gráficas usadas. *Turrialba*. 21: 253-271.
- Sohi, S., Lopez-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. 64 pp. <http://www.csiro.au/files/files/poei.pdf>
- Steiner, C. 2006. Slash and char as alternative to slash and burn. *Universitat Bayreuth*. Germany.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K.Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph, and A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*. 327:235–246.
- Wang, J., Pan, X., Liu, Y., Zhang, X. and Xiong, Z. 2012. Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production. *Plant Soil*. (J. Lehmann ed.). Springer Science. <http://www.ireea.cn/upfiles/20130428102915132.pdf>. Julio de 2012.

ANEXO 1

BIOMASA Y VALORES DE NITRÓGENO FÓSFORO Y POTÁSIO DE *Lolium perenne* CON TRES BIOCARBONES, CUATRO CORTES.

Cuadro 1. Biomasa (g) de *Lolium perenne* con tres biocarbones, cuatro cortes.

Biocarbón < 4 mm y T 300° C				
Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
E1T1R1	6.82	2.78	2.58	2.26
E1T1R2	8.05	3.32	2.92	2.55
E1T1R3	7.06	3.01	2.67	2.43
E1T1R4	7.75	3.24	3.05	2.49
E1T2R1	7.49	3.49	3.07	2.62
E1T2R2	7.39	3.2	2.94	2.52
E1T2R3	7.10	3.05	3.05	2.78
E1T2R4	8.05	3.08	1.98	1.59
E1T3R1	7.27	3.33	2.98	2.59
E1T3R2	7.35	2.99	3.35	2.28
E1T3R3	7.78	3.78	2.76	2.71
E1T3R4	7.49	3.74	2.47	2.56
E1T4R1	7.90	3.73	3.05	2.31
E1T4R2	7.16	3.67	2.55	3.12
E1T4R3	7.40	3.13	2.84	2.06
E1T4R4	8.11	3.01	2.04	2.74
E1T5R1	8.09	3.43	3.28	3
E1T5R2	7.80	3.28	3.02	2.99
E1T5R3	7.33	3.14	3.13	2.89
E1T5R4	7.96	3.17	2.78	2.88
E1T6R1	9.38	5.42	6.53	4.75
E1T6R2	8.94	5.94	4.82	4.66
E1T6R3	8.90	6.5	7.35	6.12
E1T6R4	8.53	4.89	5.84	5.71
E1T7R1	9.09	5.78	6	5.57
E1T7R2	8.42	4.5	5.78	5.36
E1T7R3	9.33	4.79	5.46	4.69
E1T7R4	8.76	4.9	4.61	5.25
E1T8R1	8.64	4.87	4.47	4.43
E1T8R2	8.85	6.38	5.28	5.06
E1T8R3	9.61	4.74	5.32	4.98
E1T8R4	8.67	4.67	5.87	4.79
E1T9R1	8.96	6.86	5.29	3.4
E1T9R2	8.37	4.71	5.58	5.51
E1T9R3	8.79	6.35	6.17	6.22
E1T9R4	8.59	5.72	6.56	6.83
E1T10R1	8.58	4.43	5.16	4.34
E1T10R2	8.59	5.7	4.49	5.7
E1T10R3	8.71	5.41	5.51	4.55
E1T10R4	9.27	4.88	5.61	4.74

Cuadro 1. Biomasa (g) de *Lolium perenne* con tres biocarbones, cuatro cortes (continuación).

Biocarbón > 4 mm y T 650° C				
Tratamiento	C1	C2	C3	C4
E2T1R1	7.45	3.59	2.48	2.93
E2T1R2	8.25	2.93	2.75	2.75
E2T1R3	8.18	3.23	2.85	2.98
E2T1R4	7.49	3.52	2.38	2.66
E2T2R1	7.67	3.81	2.73	2.6
E2T2R2	7.60	3.48	3.07	2.58
E2T2R3	7.15	3.42	2.5	2.89
E2T2R4	6.53	2.58	2.68	2.43
E2T3R1	8.90	3.82	3.08	2.87
E2T3R2	7.94	3.28	3.13	3
E2T3R3	7.67	3.54	2.61	3.35
E2T3R4	7.74	3.83	2.95	2.54
E2T4R1	8.21	3.11	2.84	2.73
E2T4R2	8.41	3.79	3.3	2.5
E2T4R3	9.36	3.5	3.04	2.88
E2T4R4	8.66	3.25	2.84	3.27
E2T5R1	9.03	4.06	2.85	2.7
E2T5R2	8.35	3.23	3.46	3.08
E2T5R3	8.39	3.38	3.32	3.05
E2T5R4	9.61	3.5	2.89	2.29
E2T6R1	8.69	6.31	5.91	4.55
E2T6R2	9.92	7.65	7.2	7.51
E2T6R3	10.23	6.39	6.49	5.65
E2T6R4	9.70	7.73	6.44	6.43
E2T7R1	9.62	6.72	7.27	6.52
E2T7R2	10.38	6.95	7.21	6.76
E2T7R3	9.26	6.38	6.78	5.11
E2T7R4	9.72	6.4	7.08	7.61
E2T8R1	10.85	7.34	7.17	6.01
E2T8R2	8.64	5.23	6.43	4.89
E2T8R3	10.55	6.66	2.18	8.89
E2T8R4	8.87	5.62	7.02	5.72
E2T9R1	9.74	7.95	6.02	7.23
E2T9R2	9.72	7.6	7.35	7.52
E2T9R3	8.77	6.96	6.15	6.46
E2T9R4	10.89	6.27	6.63	7.13
E2T10R1	10.92	6.11	7.12	8.11
E2T10R2	10.83	6.8	8.18	6.6
E2T10R3	9.31	5.96	6.41	4.73
E2T10R4	10.05	7.15	6.15	5.69

. Cuadro 1. Biomasa (g) de *Lolium perenne* con tres biocarbones, cuatro cortes (continuación).

Biocarbón < 4 mm y T 650° C				
Tratamiento	C1	C2	C3	C4
E3T1R1	7.74	3.17	2.22	2.76
E3T1R2	7.41	2.55	2.65	2.22
E3T1R3	10.96	4.42	2.53	2.98
E3T1R4	9.33	3.38	2.36	2.38
E3T2R1	8.54	3.68	2.6	2.5
E3T2R2	8.38	3.25	2.5	3.09
E3T2R3	8.69	3.87	2.68	3.61
E3T2R4	9.04	2.44	2.29	3.47
E3T3R1	9.09	3.37	2.41	2.98
E3T3R2	9.47	4.32	2.59	2.88
E3T3R3	9.87	3.11	6.55	2.73
E3T3R4	10.79	3.72	2.89	2.5
E3T4R1	8.73	1.97	2.55	2.56
E3T4R2	8.34	3.85	3.13	2.76
E3T4R3	8.23	3.66	2.91	2.46
E3T4R4	10.27	2.91	2.68	3.02
E3T5R1	9.25	3.92	2.75	2.81
E3T5R2	7.75	2.87	2.5	2.82
E3T5R3	6.08	3.52	2.46	2.19
E3T5R4	8.84	2.89	2.54	2.62
E3T6R1	11.25	5.81	6.65	6.47
E3T6R2	10.85	6.71	7.9	7.58
E3T6R3	10.52	3.43	6.32	6.45
E3T6R4	10.62	4.99	6.04	5.93
E3T7R1	10.89	2.56	6.57	6.81
E3T7R2	11.16	7.21	7.56	7.08
E3T7R3	10.73	0.52	7.59	7.31
E3T7R4	11.09	6.4	8.2	7.16
E3T8R1	9.85	6.45	5.88	6.22
E3T8R2	9.76	6.05	6.93	6.98
E3T8R3	9.60	7.34	7.29	6.6
E3T8R4	9.64	7.03	7.72	7.71
E3T9R1	11.84	7.25	7.25	7.82
E3T9R2	11.77	5.76	7.42	6.38
E3T9R3	11.07	7.02	6.52	7.16
E3T9R4	11.15	5.55	6.27	6.43
E3T10R1	10.80	5.3	7.13	7
E3T10R2	10.20	5.97	7.46	7.49
E3T10R3	10.93	5.19	6.66	6.26
E3T10R4	10.93	4.57	5.29	6.41

Cuadro 2. Valores de nitrógeno (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes.

Biocarbón < 4 mm y T 300° C				
Tratamiento	C1	C2	C3	C4
E1T1R1	4.943	2.470	2.046	1.964
E1T1R2	4.488	2.621	2.108	2.142
E1T1R3	4.796	2.691	2.039	2.074
E1T1R4	4.633	2.547	1.971	2.039
E1T2R1	4.893	2.402	2.060	2.053
E1T2R2	4.594	2.585	2.169	2.286
E1T2R3	4.784	3.205	2.039	1.950
E1T2R4	4.800	2.420	2.320	2.163
E1T3R1	4.662	2.485	2.135	2.601
E1T3R2	4.771	2.526	2.039	1.916
E1T3R3	3.828	2.696	2.197	2.101
E1T3R4	4.695	2.541	1.909	1.964
E1T4R1	4.788	2.465	1.916	1.533
E1T4R2	4.796	2.564	2.080	1.875
E1T4R3	4.421	2.576	2.293	2.163
E1T4R4	4.531	2.635	2.053	1.916
E1T5R1	4.630	2.433	1.923	1.937
E1T5R2	4.597	2.995	2.094	2.039
E1T5R3	4.757	2.602	2.019	2.163
E1T5R4	4.548	2.940	2.019	1.998
E1T6R1	4.840	3.018	2.313	2.320
E1T6R2	4.739	2.911	2.443	2.299
E1T6R3	5.082	3.097	2.354	2.019
E1T6R4	4.732	3.323	2.279	2.163
E1T7R1	4.814	2.696	2.361	2.238
E1T7R2	4.631	2.747	2.217	1.985
E1T7R3	5.012	2.940	2.334	2.368
E1T7R4	4.798	2.639	2.614	2.553
E1T8R1	4.834	1.417	2.546	2.320
E1T8R2	4.824	2.892	2.580	2.286
E1T8R3	4.690	3.041	2.470	2.231
E1T8R4	4.365	2.800	2.340	2.299
E1T9R1	6.028	2.871	2.457	2.368
E1T9R2	4.736	2.690	2.217	2.176
E1T9R3	7.442	3.107	2.402	2.128
E1T9R4	4.822	2.761	2.190	2.053
E1T10R1	4.875	2.641	2.525	2.642
E1T10R2	4.645	2.967	2.368	2.101
E1T10R3	4.835	2.862	2.156	2.272
E1T10R4	4.615	2.971	2.279	2.382

Cuadro 2. Valores de nitrógeno (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes (continuación).

Biocarbón > 4 mm y T 650° C				
Tratamiento	C1	C2	C3	C4
E2T1R1	4.630	2.704	2.039	1.960
E2T1R2	4.650	1.788	1.855	1.857
E2T1R3	4.557	2.553	1.923	1.912
E2T1R4	4.764	2.574	1.923	1.843
E2T2R1	4.525	2.541	1.950	2.048
E2T2R2	4.552	2.805	2.101	2.172
E2T2R3	4.675	2.504	1.991	2.185
E2T2R4	4.797	2.585	1.916	2.014
E2T3R1	4.523	2.350	1.902	2.131
E2T3R2	4.499	2.548	1.991	2.014
E2T3R3	4.598	2.424	2.662	2.069
E2T3R4	4.547	2.399	2.012	2.158
E2T4R1	4.641	2.735	2.080	2.137
E2T4R2	4.466	2.487	1.944	2.117
E2T4R3	4.248	2.361	1.902	1.788
E2T4R4	4.600	2.609	1.991	2.425
E2T5R1	4.126	2.350	1.889	2.096
E2T5R2	4.577	2.473	2.060	2.117
E2T5R3	4.379	2.338	1.882	2.096
E2T5R4	4.243	2.161	1.841	1.754
E2T6R1	4.590	2.674	2.163	1.987
E2T6R2	4.948	2.851	2.149	2.021
E2T6R3	4.901	3.103	2.163	1.563
E2T6R4	4.862	3.049	2.265	2.103
E2T7R1	4.866	2.975	2.094	1.939
E2T7R2	4.889	2.679	2.128	2.336
E2T7R3	4.840	3.229	2.388	2.377
E2T7R4	4.950	3.294	2.183	2.007
E2T8R1	4.706	3.005	2.238	2.350
E2T8R2	4.972	3.109	2.539	2.603
E2T8R3	4.853	2.935	2.204	2.048
E2T8R4	4.861	3.082	2.163	2.247
E2T9R1	4.800	2.793	2.525	2.206
E2T9R2	4.959	2.781	2.340	2.336
E2T9R3	4.959	3.532	2.395	2.267
E2T9R4	4.817	2.914	2.074	1.918
E2T10R1	4.714	2.847	2.019	2.028
E2T10R2	4.814	2.835	2.142	2.110
E2T10R3	4.870	3.111	2.443	0.735
E2T10R4	4.865	3.446	2.573	2.343

Cuadro 2. Valores de nitrógeno (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes (continuación).

Biocarbón < 4 mm y T 650° C				
Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
E3T1R1	4.663	2.471	2.055	1.891
E3T1R2	4.776	2.677	2.031	1.994
E3T1R3	4.709	2.290	1.996	1.829
E3T1R4	4.545	2.560	2.113	2.035
E3T2R1	4.506	2.813	2.085	1.754
E3T2R2	4.692	2.523	2.020	1.802
E3T2R3	3.792	2.209	2.017	1.809
E3T2R4	4.072	2.701	2.213	1.829
E3T3R1	4.291	2.682	2.083	1.980
E3T3R2	4.098	2.419	2.045	1.727
E3T3R3	4.520	2.591	1.987	1.775
E3T3R4	4.336	2.386	2.015	1.713
E3T4R1	4.267	2.585	2.062	1.877
E3T4R2	4.553	2.307	1.994	1.747
E3T4R3	4.126	2.717	2.216	2.001
E3T4R4	4.359	2.470	1.966	1.871
E3T5R1	4.379	2.346	1.910	1.809
E3T5R2	4.606	2.505	2.027	1.754
E3T5R3	4.228	2.395	1.936	1.912
E3T5R4	4.325	2.632	2.076	1.912
E3T6R1	3.194	3.012	2.253	2.014
E3T6R2	4.858	2.619	2.183	0.967
E3T6R3	4.886	3.389	2.482	2.021
E3T6R4	4.557	3.295	2.493	2.103
E3T7R1	4.845	3.098	2.405	2.090
E3T7R2	4.646	3.086	2.272	1.829
E3T7R3	4.571	3.016	2.255	1.987
E3T7R4	5.096	2.801	2.192	2.001
E3T8R1	4.920	3.479	2.027	1.946
E3T8R2	5.005	3.369	2.349	2.110
E3T8R3	4.702	2.995	2.211	1.905
E3T8R4	4.641	3.010	2.141	1.768
E3T9R1	4.695	2.954	2.176	1.871
E3T9R2	4.893	2.916	2.514	1.994
E3T9R3	4.836	3.188	2.332	1.980
E3T9R4	4.611	2.848	2.437	1.912
E3T10R1	4.940	3.018	2.272	2.048
E3T10R2	4.467	3.115	2.424	2.042
E3T10R3	4.856	2.458	2.433	2.028
E3T10R4	4.504	3.072	2.398	2.131

Cuadro 3. Valores de fósforo (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes.

Biocarbón < 4 mm y T 300° C				
Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
E1T1R1	0.594	0.713	0.639	0.557
E1T1R2	0.564	0.685	0.574	0.486
E1T1R3	0.600	0.662	0.625	0.486
E1T1R4	0.561	0.676	0.606	0.514
E1T2R1	0.583	0.704	0.630	0.514
E1T2R2	0.594	0.694	0.546	0.459
E1T2R3	0.583	0.653	0.606	0.514
E1T2R4	0.581	0.727	0.630	0.503
E1T3R1	0.572	0.713	0.602	0.541
E1T3R2	0.569	0.736	0.644	0.514
E1T3R3	0.567	0.644	0.602	0.519
E1T3R4	0.572	0.699	0.569	0.503
E1T4R1	0.561	0.694	0.634	0.524
E1T4R2	0.586	0.699	0.588	0.514
E1T4R3	0.592	0.778	0.634	0.530
E1T4R4	0.581	0.685	0.583	0.503
E1T5R1	0.581	0.639	0.606	0.530
E1T5R2	0.575	0.644	0.606	0.535
E1T5R3	0.606	0.722	0.606	0.503
E1T5R4	0.586	0.667	0.593	0.497
E1T6R1	0.514	0.694	0.606	0.524
E1T6R2	0.542	0.736	0.685	0.503
E1T6R3	0.550	0.718	0.722	0.470
E1T6R4	0.575	0.699	0.718	0.497
E1T7R1	0.550	0.750	0.667	0.514
E1T7R2	0.575	0.796	0.662	0.400
E1T7R3	0.517	0.681	0.514	0.497
E1T7R4	0.533	0.727	0.486	0.519
E1T8R1	0.556	0.676	0.690	0.503
E1T8R2	0.536	0.759	0.630	0.535
E1T8R3	0.531	0.727	0.718	0.530
E1T8R4	0.528	0.639	0.634	0.486
E1T9R1	0.550	0.731	0.630	0.314
E1T9R2	0.569	0.755	0.588	0.519
E1T9R3	0.556	0.745	0.741	0.535
E1T9R4	0.531	0.843	0.606	0.497
E1T10R1	0.525	0.694	0.505	0.541
E1T10R2	0.531	0.713	0.648	0.519
E1T10R3	0.558	0.769	0.690	0.508
E1T10R4	0.536	0.671	0.625	0.476

Cuadro 3. Valores de fósforo (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes (continuación).

Biocarbón > 4 mm y T 650° C				
TTMO	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
E2T1R1	0.55	0.68	0.57	0.51
E2T1R2	0.59	0.70	0.56	0.52
E2T1R3	0.57	0.71	0.56	0.48
E2T1R4	0.58	0.68	0.56	0.50
E2T2R1	0.59	0.67	0.59	0.50
E2T2R2	0.59	0.68	0.56	0.51
E2T2R3	0.58	0.65	0.54	0.49
E2T2R4	0.61	0.69	0.63	0.54
E2T3R1	0.49	0.68	0.59	0.51
E2T3R2	0.60	0.67	0.54	0.49
E2T3R3	0.59	0.62	0.54	0.48
E2T3R4	0.58	0.69	0.57	0.49
E2T4R1	0.54	0.67	0.60	0.51
E2T4R2	0.57	0.65	0.56	0.50
E2T4R3	0.58	0.68	0.54	0.51
E2T4R4	0.61	0.63	0.59	0.55
E2T5R1	0.62	0.69	0.51	0.50
E2T5R2	0.59	0.68	0.54	0.50
E2T5R3	0.59	0.62	0.54	0.49
E2T5R4	0.61	0.68	0.52	0.48
E2T6R1	0.54	0.75	0.65	0.50
E2T6R2	0.55	0.70	0.78	0.49
E2T6R3	0.56	0.63	0.62	0.50
E2T6R4	0.55	0.74	0.61	0.51
E2T7R1	0.56	0.67	0.61	0.51
E2T7R2	0.54	0.75	0.63	0.51
E2T7R3	0.53	0.65	0.62	0.55
E2T7R4	0.53	0.64	0.63	0.54
E2T8R1	0.54	0.70	0.54	0.50
E2T8R2	0.58	0.73	0.61	0.55
E2T8R3	0.50	0.78	0.71	0.52
E2T8R4	0.58	0.72	0.65	0.51
E2T9R1	0.55	0.69	0.52	0.54
E2T9R2	0.50	0.78	0.54	0.53
E2T9R3	0.53	0.69	0.59	0.51
E2T9R4	0.52	0.81	0.64	0.55
E2T10R1	0.51	0.72	0.64	0.50
E2T10R2	0.55	0.76	0.57	0.52
E2T10R3	0.53	0.65	0.60	0.52
E2T10R4	0.54	0.69	0.61	0.50

Cuadro 3. Valores de fósforo (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes (continuación).

Biocarbón < 4 mm y T 650° C				
Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
E3T1R1	0.60	0.63	0.50	0.55
E3T1R2	0.58	0.63	0.45	0.51
E3T1R3	0.56	0.71	0.46	0.52
E3T1R4	0.59	0.64	0.51	0.55
E3T2R1	0.61	0.72	0.49	0.55
E3T2R2	0.55	0.69	0.52	0.52
E3T2R3	0.57	0.69	0.45	0.54
E3T2R4	0.33	0.67	0.49	0.50
E3T3R1	0.56	0.71	0.45	0.52
E3T3R2	0.55	0.67	0.50	0.51
E3T3R3	0.55	0.71	0.45	0.51
E3T3R4	0.60	0.70	0.53	0.53
E3T4R1	0.57	0.68	0.46	0.56
E3T4R2	0.56	0.60	0.31	0.51
E3T4R3	0.33	0.64	0.49	0.51
E3T4R4	0.58	0.64	0.32	0.51
E3T5R1	0.57	0.70	0.48	0.43
E3T5R2	0.54	0.64	0.50	0.57
E3T5R3	0.56	0.69	0.47	0.55
E3T5R4	0.56	0.63	0.49	0.56
E3T6R1	0.54	0.68	0.54	5.08
E3T6R2	0.56	0.83	0.52	0.52
E3T6R3	0.52	0.68	0.55	0.57
E3T6R4	0.33	0.70	0.55	0.55
E3T7R1	0.55	0.78	0.49	0.56
E3T7R2	0.58	0.69	0.53	0.54
E3T7R3	0.30	0.76	0.58	0.55
E3T7R4	0.54	0.71	0.51	0.52
E3T8R1	0.48	0.65	0.51	0.51
E3T8R2	0.54	0.71	0.50	0.56
E3T8R3	0.54	0.77	0.55	0.55
E3T8R4	0.52	0.69	0.52	0.50
E3T9R1	0.53	0.76	0.59	0.61
E3T9R2	0.52	0.73	0.56	0.54
E3T9R3	0.52	0.71	0.59	0.62
E3T9R4	0.48	0.68	0.52	0.52
E3T10R1	0.89	0.86	0.55	0.55
E3T10R2	0.88	0.79	0.58	0.55
E3T10R3	0.88	0.70	0.49	0.57
E3T10R4	0.88	0.75	0.55	0.59

Cuadro 4. Valores de potasio (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes.

Biocarbón < 4 mm y T 300° C				
Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte3	Corte 4
E1T1R1	6.11	2.84	2.72	2.44
E1T1R2	6.94	3.31	2.98	3.22
E1T1R3	6.56	3.21	3.25	2.67
E1T1R4	6.45	3.19	2.98	2.34
E1T2R1	6.02	3.35	2.85	2.72
E1T2R2	6.00	3.45	3.31	3.16
E1T2R3	6.12	3.21	2.99	2.60
E1T2R4	6.63	3.03	3.28	2.56
E1T3R1	5.92	3.18	3.86	2.85
E1T3R2	7.04	3.19	3.11	2.55
E1T3R3	7.22	3.08	3.17	2.58
E1T3R4	6.54	3.36	3.04	3.19
E1T4R1	4.77	3.09	3.22	2.51
E1T4R2	7.08	3.43	3.13	2.88
E1T4R3	6.33	3.48	3.51	3.04
E1T4R4	5.36	3.40	2.98	3.13
E1T5R1	6.21	3.24	2.96	2.44
E1T5R2	6.43	3.21	2.89	2.33
E1T5R3	5.71	3.31	3.56	3.08
E1T5R4	5.90	3.38	3.19	2.99
E1T6R1	6.61	3.01	3.95	3.11
E1T6R2	4.93	2.96	3.99	4.33
E1T6R3	6.45	3.21	3.71	2.84
E1T6R4	6.01	3.04	3.95	4.07
E1T7R1	5.77	3.02	3.96	2.55
E1T7R2	5.52	2.84	3.57	3.59
E1T7R3	6.22	3.14	3.68	3.29
E1T7R4	6.53	3.46	3.77	4.08
E1T8R1	6.49	2.95	4.02	3.65
E1T8R2	6.89	3.12	3.81	3.36
E1T8R3	6.45	3.09	3.95	2.84
E1T8R4	6.65	3.22	3.92	3.63
E1T9R1	6.44	3.38	4.01	3.38
E1T9R2	6.17	3.26	3.64	3.64
E1T9R3	5.54	3.50	3.85	2.93
E1T9R4	6.35	3.15	3.66	2.71
E1T10R1	5.41	3.21	3.79	3.65
E1T10R2	7.16	3.28	3.42	3.24
E1T10R3	6.87	3.32	3.87	3.45
E1T10R4	5.93	3.23	3.71	2.81

Cuadro 4. Valores de potasio (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes (continuación).

Biocarbón > 4 mm y T 650° C				
Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte3	Corte 4
E2T1R1	3.961	3.040	2.543	2.497
E2T1R2	4.265	2.680	2.583	2.507
E2T1R3	4.105	3.539	2.629	2.814
E2T1R4	4.491	2.912	2.538	2.136
E2T2R1	4.229	2.956	2.662	2.386
E2T2R2	4.081	3.081	3.203	2.599
E2T2R3	5.105	2.875	2.990	2.671
E2T2R4	4.986	3.585	2.818	2.550
E2T3R1	4.084	3.152	2.882	2.621
E2T3R2	4.815	2.897	2.676	2.649
E2T3R3	5.052	2.342	2.814	2.365
E2T3R4	4.133	3.099	2.591	2.352
E2T4R1	4.293	3.400	2.875	2.872
E2T4R2	4.616	3.149	2.808	3.436
E2T4R3	4.222	4.100	2.623	2.287
E2T4R4	4.416	3.423	2.707	2.621
E2T5R1	4.295	5.684	2.584	2.450
E2T5R2	4.055	3.221	3.346	2.907
E2T5R3	5.057	3.570	2.815	2.334
E2T5R4	4.513	2.622	2.610	2.749
E2T6R1	4.289	3.237	3.343	3.361
E2T6R2	5.776	4.703	2.277	2.780
E2T6R3	4.425	3.148	3.170	2.965
E2T6R4	4.415	3.441	3.328	2.765
E2T7R1	5.079	3.403	2.920	3.060
E2T7R2	5.387	2.388	3.280	2.938
E2T7R3	4.049	2.996	3.778	3.178
E2T7R4	4.370	2.833	2.996	2.817
E2T8R1	5.266	2.703	3.789	2.706
E2T8R2	3.857	3.370	4.041	3.158
E2T8R3	5.788	3.060	3.442	2.696
E2T8R4	4.357	3.217	3.043	2.483
E2T9R1	3.900	2.677	3.230	2.848
E2T9R2	5.698	2.740	3.178	2.806
E2T9R3	4.395	3.488	5.358	2.921
E2T9R4	3.651	3.083	2.829	2.747
E2T10R1	5.057	2.823	3.289	2.934
E2T10R2	4.799	3.298	3.094	2.904
E2T10R3	4.146	2.906	3.091	3.332
E2T10R4	4.135	3.334	4.195	3.150

Cuadro 4. Valores de potasio (%) en *Lolium perenne* con tres biocarbones y cuatro cortes (continuación).

Biocarbón < 4 mm y T 650° C				
Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte3	Corte 4
E3T1R1	4.494	2.682	2.812	2.259
E3T1R2	4.428	3.072	2.801	2.195
E3T1R3	4.486	3.000	2.665	2.080
E3T1R4	3.614	2.777	2.958	2.679
E3T2R1	4.276	3.581	3.228	2.427
E3T2R2	4.332	3.148	2.803	2.207
E3T2R3	4.685	3.085	2.655	2.329
E3T2R4	3.134	2.846	2.716	2.462
E3T3R1	4.801	3.097	2.788	2.526
E3T3R2	4.392	3.373	2.723	2.129
E3T3R3	4.336	2.836	2.724	2.180
E3T3R4	4.249	2.479	2.913	2.251
E3T4R1	3.731	2.502	2.619	2.607
E3T4R2	3.999	2.470	3.081	2.448
E3T4R3	4.625	2.634	2.819	2.513
E3T4R4	4.453	2.809	3.288	2.183
E3T5R1	4.268	2.348	2.593	2.079
E3T5R2	4.650	3.002	2.676	2.211
E3T5R3	4.595	3.120	2.670	2.292
E3T5R4	3.851	2.393	2.669	2.399
E3T6R1	3.816	2.801	3.008	3.095
E3T6R2	3.946	2.861	3.173	2.539
E3T6R3	4.251	3.326	3.157	2.696
E3T6R4	4.965	2.929	3.265	2.889
E3T7R1	3.921	2.872	3.038	3.426
E3T7R2	4.171	2.911	3.435	2.548
E3T7R3	3.295	2.908	3.055	2.855
E3T7R4	4.265	2.948	3.435	2.509
E3T8R1	3.940	2.839	3.067	2.643
E3T8R2	4.102	2.449	3.263	3.152
E3T8R3	4.735	2.963	3.093	2.965
E3T8R4	4.145	2.950	3.148	2.553
E3T9R1	3.898	2.702	2.916	2.922
E3T9R2	3.914	1.952	3.217	2.487
E3T9R3	3.937	3.256	2.817	2.628
E3T9R4	2.990	2.681	3.164	2.676
E3T10R1	4.561	3.247	3.127	2.760
E3T10R2	3.502	3.155	2.976	3.047
E3T10R3	4.586	3.147	3.236	2.547
E3T10R4	3.470	3.390	3.088	2.872

- T 1 0 ton ha⁻¹ de biocarbón (más fertilización química)
- T 2 5 ton ha⁻¹ de biocarbón (más fertilización química)
- T 3 10 ton ha⁻¹ de biocarbón (más fertilización química)
- T 4 15 ton ha⁻¹ de biocarbón (más fertilización química)
- T 5 20 ton ha⁻¹ de biocarbón (más fertilización química)
- T 6 0 ton ha⁻¹ de biocarbón (más lombricomposta)
- T 7 5 ton ha⁻¹ de biocarbón (más lombricomposta)
- T 8 10 ton ha⁻¹ de biocarbón (más lombricomposta)
- T 9 15 ton ha⁻¹ de biocarbón (más lombricomposta)
- T 10 20 ton ha⁻¹ de biocarbón (más lombricomposta)