



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPUS MONTECILLO
EDAFOLOGIA**

**BIOCARBÓN (BIOCHAR) DE RESIDUOS FORESTALES Y AGRÍCOLAS
COMO ALTERNATIVA PARA CAPTURAR CARBONO**

GUADALUPE PÉREZ GONZÁLEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2015

La presente tesis, titulada: **BIOCARBÓN (BIOCHAR) DE RESIDUOS FORESTALES Y AGRÍCOLAS COMO ALTERNATIVA PARA CAPTURAR CARBONO**, realizada por el alumna: **Guadalupe Pérez González**, 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
EDAFOLOGÍA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:

 Dra. Claudia María Isabel Hidalgo Moreno

ASESOR:

 Dr. Jorge Dionisio Etchevers Barra

ASESOR:

 Dr. Esteban Valtierra Pacheco

ASESOR:

 Dr. Bernardus Hendricus Jozeph de Jong

ASESOR:

 Dr. Sergio Salgado García

Montecillo, Texcoco, México, 28 de mayo de 2015

BIOCARBÓN (BIOCHAR) DE RESIDUOS FORESTALES Y AGRÍCOLAS COMO ALTERNATIVA PARA CAPTURAR CARBONO

GUADALUPE PÉREZ GONZÁLEZ
COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2015

RESUMEN

Algunos residuos de las actividades agropecuarias, forestales y agroindustriales tienen el potencial de convertirse en fuentes de energía renovable, aprovechando su contenido de carbono. Esto se lleva a cabo mediante un proceso que transforma la biomasa mediante pirólisis, que es una conversión termoquímica en atmósferas reducidas en oxígeno. Como subproducto de esta transformación se genera biocarbón (biochar) y al proceso mediante el cual se produce éste se le ha denominado Sistema Biocarbón-Pirólisis (PBS). En economías de orientación agrícola y forestal, con bajo desarrollo tecnológico como la mexicana, el uso apropiado de la biomasa de los residuos (rastros de maíz y trigo, bagazo de caña, paja de caña, cascarilla de café, cascarillas de arroz) ofrece alternativas para reducir los costos de operación por concepto de insumos energéticos. Además, es una solución para los problemas higiénico-ambientales que pueden presentar los desechos orgánicos. En la presente investigación se trabajó con dos residuos, el primero ligado a la actividad cañera (bagazo de caña de azúcar) y el segundo asociado a la actividad forestal (aserrín). Estos residuos se seleccionaron por la importancia que representa la agregación de valor a los mismos, porque pueden ser destinados a otras actividades para iniciar fuentes de trabajo. El biocarbón es un material sólido, poroso, carbonoso y ha generado mucho interés debido a sus diversos usos para la agricultura. Hoy en día el biocarbón combinado con suelo se ha propuesto para sustituir algunos materiales usados como sustratos en viveros. Estos materiales tienen una vida corta y son costosos. Es por eso que los sustratos elaborados a partir de los residuos agrícolas como el aserrín de pino y bagazo de caña azúcar

pirolizados en forma de biocarbón son una alternativa. El objetivo general de este trabajo fue elaborar biocarbones a partir bagazo de caña de azúcar y de aserrín de pino. Se evaluó el efecto de características físicas de los residuos usados para elaborar los biocarbones, como tipo de material y tamaño de partícula, sobre las propiedades físico-químicas de los biocarbones elaborados. También se evaluó el desempeño del biocarbón de caña de azúcar como sustrato de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl en vivero. Lo anterior con objeto de definir la posibilidad de reemplazar el sustrato forestal comúnmente usado en viveros nacionales, el cual está constituido por *Peat moss*, agrolita, vermiculita y corteza de pino al 50%. Para ello se condujeron experimentos en vivero usando *Pinus greggii* Engelm. ex Parl y se evaluaron las variables de crecimiento del *Pinus greggii* Engelm. ex Parl en los sustratos elaborados al combinar los biocarbones generados con suelo y el sustrato forestal. Se diseñaron tratamientos combinando biocarbón de bagazo de caña de azúcar y aserrín de pino ambos pirolizados a 600 °C. En el caso del aserrín de pino se usaron dos tamaños de partícula grueso (> 4mm) y fino (< 4 mm). Los resultados obtenidos indican que el tipo de material usado y el tamaño de partícula del mismo determinan las características físico-químicas de los biocarbones producidos. También se concluye que es posible usar biocarbones elaborados a partir de residuos de bagazo de caña de azúcar y aserrín de pino pirolizados a 600 °C combinados con suelo como sustratos de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl en vivero. Finalmente el biocarbón de bagazo de caña de azúcar combinado con el sustrato forestal usado en México en una relación (1:9), puede sustituir al sustrato forestal constituido por *Peat moss*, agrolita, vermiculita y corteza de pino al 50% que es el más ampliamente usado en México. Lo anterior representaría un ahorro para los productores de pino en vivero.

Palabras clave: Carbono, pirólisis, biocarbón, *biochar*, bagazo, aserrín

BIOCHAR FOREST AND AGRICULTURAL WASTE AS ALTERNATIVE TO CAPTURE COAL

GUADALUPE PÉREZ GONZÁLEZ
COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2015

Abstract

Some residues of agricultural, forestry and agro-industrial activities have the potential to become sources of renewable energy, taking advantage of its carbon content.

This is accomplished by a process which transforms biomass by pyrolysis, a thermochemical conversion in reduced oxygen atmospheres. As a byproduct of this transformation biochar it is generated and the process by which this occurs has been called Biochar-Pyrolysis System (PBS).

In agriculture and forestry economies facing with low technological development such as Mexico, the appropriate use of biomass waste (corn stover, bagasse, sugarcane straw, coffee husk, wheat and rice husks, sawdust) it offers alternatives to reduce operating costs by concept of energy inputs. Moreover, it is a solution for hygienic environmental problems that may occur in organic waste. In this research we worked with two residues, the first activity linked to sugarcane (sugarcane bagasse) and the second associated with forestry (sawdust). These residues were chosen because of the importance it represents the aggregation of value to them, because they can be assigned to other activities to start jobs. Biochar is a solid, porous, carbonaceous material and has generated much interest because of its various uses for agriculture. Today the soil combined with biochar has been proposed to replace some materials used as substrates in nurseries. These materials have a short life and are expensive. That's why the substrates made from agricultural waste such as sawdust pine and sugar cane bagasse pyrolyzed biochar as an alternative. The overall objective of this work was to develop biocarbones from sugarcane bagasse and pine sawdust. The effect of physical characteristics of the waste used to make the biocarbones such as material type and particle size on the physicochemical properties of

processed biocarbons evaluated. Biochar performance of sugarcane as *Pinus greggii* ex Parl substrate was also evaluated. nursery. This in order to define the possibility of replacing the substrate commonly used in forest nurseries national, which consists of *peat moss*, perlite, vermiculite and pine bark 50%. To do experiments were conducted in greenhouse using *Pinus greggii*. ex Parl and growth variables were evaluated *Pinus greggii*. ex Parl on substrates produced by combining the generated biocarbons soil and forest soil. Combining biochar bagasse sugarcane and pine sawdust pyrolyzed at 600 °C both treatments were designed. Two coarse particle size (> 4 mm) and fine (<4 mm) were used in the case of pine sawdust. The results indicate that the type of material used and the particle size thereof determine the physico-chemical characteristics biocarbons produced. It also concludes that it is possible to use biocarbons made from waste bagasse from sugar cane and pine sawdust pyrolyzed at 600 ° C combined with soil and substrates *Pinus greggii* ex Parl nursery. Finally biochar bagasse sugar combined with forest substrate used in Mexico in a relationship (1: 9), can replace the forest substrate containing *peat moss*, perlite, vermiculite and pine bark 50% which is the most widely used in Mexico. This would represent a saving for producers of pine nursery.

Keywords: Carbon, pyrolysis biochar, biochar, bagasse, sawdust

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Colegio de Postgraduado porque me dio la oportunidad de formarme como Doctora en Ciencias.

Al CONACYT por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios doctorales.

A los mexicanos que a través del CONACYT me apoyaron a con sus impuestos.

A la doctora Dra. Claudia María Isabel Hidalgo Moreno por su apoyo en mi formación como académica.

A todo mi Consejo Particular por la guía y tiempo dedicado a mi formación en el proceso de doctorado.

A cada una de las personas que me apoyaron y guiaron en todo este proceso de formación.

Al Laboratorio de Fertilidad de Suelos por el apoyo brindado en el desarrollo del trabajo analítico realizado en mi trabajo de tesis.

A la maestra Juliana Padilla Cuevas por su apoyo en los cálculos de las determinaciones analíticas.

A Lourdes Morales Pérez por su apoyo profesional y moral.

Al ingeniero Lucio Leos Escobedo por su apoyo brindado en este trabajo de investigación.

A mi hijo Diego Jaques Geneste Pérez por ser mi inspiración y el motivo para ser mejor profesionista y madre cada día.

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL.....	iii
AGRADECIMIENTOS	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE CUADROS y FIGURAS.....	ix
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
LITERATURA CITADA	4
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
HIPÓTESIS GENERAL.....	6
HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	6
CAPÍTULO 2.....	7
EL BIOCARBÓN (BIOCHAR) COMO ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES	7
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	9
CONCLUSIÓN.....	26
LITERATURA CITADA	27
CAPÍTULO 3.....	34
BIOCARBÓN DE RESIDUOS AGRO-INDUSTRIALES USADOS COMO SUSTRATOS PARA PLANTULAS DE <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.....	34
RESUMEN	34
INTRODUCCIÓN	36
MATERIALES Y METODOS	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
CONCLUSIÓN.....	54
LITERATURA CITADA	55
CAPÍTULO 4.....	59
EVALUACIÓN DE BIOCARBÓN DE CAÑA DE AZÚCAR COMO SUSTRATO PARA EL DESARROLLO DE <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl. EN VIVERO FORESTAL.....	59
RESUMEN	59
INTRODUCCIÓN	62
MATERIALES Y METODOS	63
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
CONCLUSIÓN.....	78
LITERATURA CITADA	81
CAPÍTULO 5.....	85
RECOMENDACIONES.....	87
ANEXOS	88
1.Base de datos de SAS	88
2. Análisis de ANOVA para las variables de crecimiento y concentración de nutrientes en biomasa aérea y radicular.....	89
3. Análisis físico-químicos de los biocarbones.....	93
4. Prueba de germinación de <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl. en los biocarbones.....	94
5. Porosidad de biocarbones observada con microscopio electrónico de barrido (MEB).	94

LISTA DE CUADROS y FIGURAS

Cuadro 3.1. Materiales utilizados y tamaño de partícula para obtener el biocarbón en condiciones de pirólisis.	41
Cuadro 3. 2. Caracterización de los biocarbones de estudio, obtenidos de residuos agro-industriales generados en el presente experimento.	46
Cuadro 3.3. Características físico-químicas de los biocarbones obtenidos de residuos agro-industriales generados en el presente experimento.	48
Cuadro 3.4. Variables de crecimiento del <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl. en tratamientos elaborados con diferente tamaño de partícula.	49
Cuadro 3.5. Valores medios para los elementos nutrimentales en biomasa aérea y biomasa radical de plantas de <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl., en los biocarbones de estudio obtenidos de residuos agro-industriales.	51
Cuadro 3. 6. Valores medios para los sustratos y las variables de crecimiento con significancia en biocarbones de residuos agro-industriales.	52
Cuadro 3. 7. Elementos totales encontrados en la biomasa aérea y la biomasa radical de plantas de <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl. en biocarbones de residuos agro-industriales.	53
Cuadro 4. 1. Valores medios para las variables de crecimiento en <i>Pinus greggii</i> Engelm. Ex Parl. con y sin fertilización.	67
Cuadro 4. 2. Valores medios para las variables de crecimiento en <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl. en los tratamientos.	69
Cuadro 4. 3. Efecto de la fertilización sobre los valores medios de las variables respuesta de crecimiento en los tratamientos evaluados.	71
Cuadro 4. 4. Concentración en biomasa aérea de <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl., cultivado en diferentes tratamientos.	73
Cuadro 4. 5. Nutrimentos en biomasa radical de <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl. valores medios con fertilización y sin fertilización en los tratamientos.	75
Cuadro 4. 6. Respuesta de la concentración de elementos nutrimentales en los tratamientos y niveles de fertilización para la biomasa aérea de <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.	76
Cuadro 4. 7. Respuesta significativa de los elementos nutrimentales en los tratamientos y fertilización para la biomasa radical de <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.	77
Figura 4. 1. Relación de la biomasa aérea/biomasa radicular, en los niveles de fertilización para cada uno de los tratamientos de estudio a los 244 DDS.	72

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

El biocarbón (*biochar*) es el producto semi-carbonizado obtenido por el tratamiento térmico de la biomasa, bajo un entorno limitado o sin oxígeno (pirólisis) (Lehmann *et al.*, 2006). La pirólisis es proceso termoquímico que se lleva a cabo a temperaturas que varían entre 300 y 600 °C. El biocarbón está constituido principalmente por carbono (70-80%) (Lehmann *et al.*, 2002). Este material ha sido considerado como un componente importante en las propuestas para mitigar las emisiones de gases efecto invernadero como CO₂ y N₂O, debido a que puede retenerlos y capturarlos (Lehmann *et al.*, 2006a, Yanai *et al.*, 2007). También ha recibido mucha importancia porque se puede usar como mejorador de las características y propiedades físicas, químicas y biológica del suelo (Lehmann y Joseph, 2009). Se ha reportado que el biocarbón (*biochar*) en el suelo también puede aumentar la capacidad de intercambio de cationes y favorecer el desarrollo de microorganismos (Liang *et al.*, 2006; Hockaday *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2008). El biocarbón puede favorecer la retención nutrientes (Clough y Condon, 2010) y la estructura del suelo (Liu *et al.*, 2012). Los biocarbones pueden ser ácidos o alcalinos, aquellos con pH alcalino pueden ser usados como correctores de la acidez en los suelos (Novak *et al.*, 2009). El biocarbón (*biochar*) puede elaborarse de diferentes materias primas, las más frecuentemente empleadas han sido madera del árbol, residuos agroindustriales, residuos agrícolas, estiércoles de ganado y ave, además de residuos forestales y de podas.

En éste documento se presentan los estudios que se realizaron tendientes a preparar y evaluar el desempeño de biocarbones producidos a partir de residuos agro-forestales como sustratos en

vivero de árboles forestales de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. Se consideraron dos tipos de residuos, los provenientes de la producción e industrialización de la caña de azúcar, el bagazo y los residuos. Así como el aserrín de pino, subproducto de la industria forestal, generado en los aserraderos. El uso del bagazo de caña es muy diverso, para la producción de vapor y energía en centrales azucareras, como complemento para preparar alimento para ganado, obtención de biogás, etc., se pensó que este material debería ser evaluado como biocarbón dada la generación de una importante cantidad del mismo. Esta misma consideración se tuvo para preparar y evaluar el biocarbón de aserrín de pino. Adicionalmente, se ha considerado que estos residuos generan, contaminación en los lugares donde se encuentran sin ningún uso y podrían ocasionar afecciones a la salud de los pobladores.

En un país como México en donde hay una necesidad de reactivar la economía del campo para hacerlo más competitivo, es necesario crear fuentes de trabajo y generar innovaciones. Una forma es dar valor agregado a los residuos, proceso que genera recursos económicos, crea fuentes de trabajo, previene la contaminación de los ecosistemas con estos residuos sin uso. La innovación que se presenta en este trabajo no es original ya que ha sido generada en otras partes del mundo, sin embargo el uso de biocarbones como sustratos en viveros o invernaderos es reciente (Dumroese *et al.*, 2011, Nelson, 2012, Altland y Locke, 2012) y en México solo ha sido reportada por Escalante *et al.* (2014).

El presente trabajo se divide en cuatro capítulos. El primero corresponde a una introducción general al tema. En el segundo se presenta una revisión bibliográfica que pone de manifiesto la importancia de los residuos agro-forestales en México y la necesidad de darles un valor agregado. En el tercer capítulo se evaluó un prototipo artesanal para elaborar biocarbón y se caracterizaron los biocarbones producidos. Adicionalmente en este tercer capítulo se evaluó el

efecto que tiene tanto el tipo de material usado para elaborar el biocarbón (bagazo de caña de azúcar, aserrín de pino), y el tamaño de partícula (aserrín de pino) en las características de los biocarbones elaborados en el prototipo artesanal. En el cuarto capítulo se evaluó el biocarbón de bagazo de caña de azúcar como sustrato en vivero de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. En el quinto capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo. Además en este documento se incluyen una serie de Anexos que comprende información adicional. Una parte de ella son resultados parcialmente discutidos y que serán usados en publicaciones posteriores. Otra parte son resultados de los análisis estadísticos y la base de datos de los resultados de análisis químico de los biocarbones generados, algunos de los cuales no se reportan en los capítulos antes mencionados.

LITERATURA CITADA

- Altland, J.E. and J.C. Locke. 2012. Biochar affects macronutrient leaching from a soilless substrate. *HortScience*. 47:1136-1140.
- Cheng, C.H., J. Lehmann and M. Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soil: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 72: 1598-1610.
- Clough, T.J. and L.M. Condon. 2010. Biochar and the nitrogen cycle. Introduction. *J. Environ. Qual.* 39:1218–1223.
- Dumroese, R.K., J. Heiskanen, K. Englund and A. Tervahauta. 2011. Pelleted biochar: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomass Bioenerg.* 35:2018-2027.
- Escalante, R.M.A. 2014. Biocarbones (Biochars), caracterización y efectos en la biomasa y nutrición de NPK en una gramínea. Colegio de Posgraduados. Texcoco, México. 124.
- Hockaday, W.C., A.M. Grannas, S. Kim, and P.G. Hatcher. 2007. The transformation and mobility of charcoal in a fire-impacted watershed. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 71 (34): 3432-3445.
- Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Ed Earthscan, London, UK, 404 p.
- Lehmann, J., J. Gaunt and M. Rondón. 2006. Biocarbón Secuestro en terrestres ecosistemas a review. Mitigation and adaptation strategies for Global Change. *J. Atmos. Sci.* 11: 403-427.
- Lehmann, J., J.P. da Silva, M. Rondon, M.S. Cravo, J. Greenwood, T. Nehls, C. Steiner and B. Glaser. 2002. 'Slash-and-char – a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon?', *Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science*, (pp. 1–12) Bangkok, Thailand. CD-ROM Paper no. 449.
- Liang, B., J. Lehmann, J. Solomon, D. Kinyangi, J. Grossman, J. O'Neill, B. Skjemstad, J.O. Thies, J. Luizão, F.J. Petersen and J. Neves. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. America J.* 70: 1719-1730.
- Liu, X.H., F.P. Han, X.C. Zhang. 2012. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: Results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture & Biology*, pp. 975-979.
- Nelson, P.V. 2012. *Greenhouse operation and management*. 7th ed. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

- Novak, J. M., W. J. Busscher, D. 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 Science*. 174(2): 105-112.
- Yanai, Y., K. Toyota and M. Okazanaki. 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments, *Soil Science and Plant Nutrition*. 53:181-188.

OBJETIVO GENERAL

Elaborar biocarbones (biochar) a partir de aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar y evaluar su desempeño como sustrato de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en vivero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar biocarbón (biochar) a partir de residuos de aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar.
- Determinar las características y propiedades físico-químicas de los biocarbones preparados.
- Evaluar el desempeño de los biocarbones obtenidos, como sustratos en la producción de plántulas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. bajo condiciones de vivero.

HIPÓTESIS GENERAL

- Se pueden elaborar biocarbones a partir de aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar para ser usados como sustratos en el desarrollo *Pinus greggii* Engelm. ex Parl en vivero.

HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- Los biocarbones de aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar se pueden preparar con un pirolizador artesanal.
- La naturaleza y el tamaño de partícula de los residuos de aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar, usados para elaborar biocarbones, definen las características y propiedades físico-químicas de los mismos.
- Los biocarbones elaborados a partir de aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar, pueden ser usados como sustratos para el desarrollo de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en vivero.

CAPÍTULO 2

EL BIOCARBÓN (BIOCHAR) COMO ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES

G. Pérez-González¹, C. Hidalgo-Moreno¹, J.D. Etchevers-Barra¹, B.H.J. de Jong², S. Salgado-García¹, E. Valtierra-Pacheco¹,
M.A. López -López¹

¹Programa de Edafología, Colegio de postgraduados. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56230, Estado de México; 9931450019. ²El Colegio de la Frontera Sur, Campeche Av. Rancho Polígono 2A; Parque Industrial Lerma, Campeche 24500. Autor responsable:hidalgo@colpos.mx

RESUMEN

Algunos residuos de las actividades agropecuarias, forestales y agroindustriales tienen el potencial de convertirse en fuentes de energía renovable, aprovechando su contenido de carbono. Como subproducto de esta transformación se genera biocarbón (biochar). Un método para transformar los residuos orgánicos y generar biocarbón es la pirólisis, la conversión termoquímica en atmósferas reducidas en oxígeno, y el proceso mediante el cual se produce el biocarbón se denomina Sistema Biocarbón-Pirólisis (PBS). El biocarbón es un material sólido, poroso, carbonoso y ha generado mucho interés debido a sus diversos usos para la agricultura. En economías de orientación agrícola y forestal, con bajo desarrollo tecnológico como la mexicana, el uso apropiado de la biomasa de los residuos (rastros de maíz, bagazo de caña, paja de caña, cascarilla de café, cascarillas de arroz y trigo, aserrín) ofrece alternativas para reducir los costos de operación por concepto de insumos energéticos. Además, es una solución para los problemas higiénico-ambientales que pueden presentar los desechos orgánicos. En el presente ensayo se detalla una perspectiva del uso de tres residuos, los dos primeros ligados a la actividad cañera (bagazo y paja de caña de azúcar) y el tercero asociado a la actividad forestal (aserrín). Estos residuos se seleccionaron por la importancia que representa la agregación de valor a los mismos, y destinarlos a otras actividades para iniciar fuentes de trabajo. La

generación de biocarbón puede mejorar la economía regional y disminuir los riesgos potenciales a la salud y ambientales, que representa la disposición de estos residuos al aire libre.

Palabras clave: Carbono, pirólisis, biocarbón, *biochar*, bagazo, aserrín.

INTRODUCCIÓN

Definiciones de biocarbón

El biocarbón (*biochar*) es el producto semi-carbonizado obtenido por el tratamiento térmico de la biomasa bajo un entorno limitado o sin oxígeno (pirólisis) (Lehmann *et al.*, 2006; Lehmann, 2007; Verheijen *et al.*, 2010). Es un producto no totalmente carbonizado porque la pirólisis a menudo se lleva a cabo bajo temperaturas ≤ 600 °C. La temperatura de la pirólisis confiere cambios significativos a la química molecular y los grupos funcionales del biocarbón (Amonette y Joseph, 2009). La pirólisis mediante combustión convierte al carbón contenido en la materia orgánica de los residuos, en formas de carbón más estable. La biomasa contiene tres polímeros principales (celulosa, hemicelulosa y lignina) que determinan las proporciones de carbono volátil (en *bio-oil* y gas) y de carbono estabilizado (biocarbón) en los productos de la pirólisis (Sohi *et al.*, 2009). El intervalo de 270-500 °C es la temperatura máxima para permitir la descomposición de la biomasa atribuible a ligninas, celulosa y hemicelulosa (Arteaga-Crespo *et al.*, 2012).

Las publicaciones y los reportes científicos relacionados con el biocarbón desde el año 2000 (aproximadamente 750 en la base de datos SCOPUS), muestran que hay aspectos cruciales que deben abordarse, entre ellos, la aplicación de biocarbón al suelo. Biederman y Harpole (2013) evaluaron la respuesta de distintos ecosistemas a la aplicación de biocarbón, usando un meta-análisis con 114 artículos y 371 estudios independientes. Estos autores reportaron que la adición de biocarbón al suelo aumentó la productividad de este último, así como los rendimientos de los cultivos, la disponibilidad de nutrientes, la nodulación de leguminosas con rizobios y la biomasa microbiana, en una amplia gama de condiciones pedo-climáticas. Sin embargo, otros estudios muestran efectos negativos del biocarbón en el rendimiento de los cultivos (Manya, 2012). La

literatura disponible responde algunas preguntas como los efectos del biocarbón en la biota del suelo, en el movimiento del suelo durante los procesos de erosión, particularmente en la erosión eólica. A largo plazo, es de interés conocer las consecuencias para la salud y la seguridad de los seres humanos, especialmente en relación con los contaminantes potenciales como los HAP'S (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), los metales pesados, los compuestos clorinados, etc.

Pirólisis

La pirólisis de la biomasa es un proceso de conversión termoquímica que involucra la degradación térmica en una atmósfera exenta de oxígeno o con un suministro restringido de éste y se usa desde hace miles de años para la producción de carbón vegetal. Hay tres subclases de pirólisis que dependen del tiempo y la temperatura: lenta convencional, rápida, y la de destello (*flash pyrolysis*) (Maschio *et al.*, 1992). Las condiciones para cada una son un poco arbitrarias y no hay definiciones precisas sobre las tasas de calentamiento, los tiempos de residencia, etc. (Mohan *et al.*, 2006). El proceso de pirólisis involucra una red compleja de reacciones asociadas a la descomposición de los principales constituyentes de la biomasa, como son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, que se caracterizan por su reactividad diferente. Durante la pirólisis, la descomposición térmica elimina de la biomasa gases como dióxido y monóxido de carbono, metano e hidrógeno (Lehemann *et al.*, 2006; Tsai *et al.*, 2007; Wannapeera *et al.*, 2008; Brewer *et al.*, 2009). La naturaleza y la magnitud de estas reacciones dependen de la temperatura, la velocidad de calentamiento, la atmósfera, las propiedades físicas y la composición de la biomasa, lo que también controla las proporciones relativas de sólidos, líquidos y gases que son los tres estados físicos posibles de los productos de la pirólisis (Bridgwater, 2012). Los productos

principales de la pirólisis son el aceite pirolítico (bio-aceite), el gas de síntesis con diferentes valores de energía (syngas) y el biocarbón (biochar).

Pirólisis lenta (LP)

Es un proceso continuo que se caracteriza por el calentamiento del material orgánico sólido en ausencia de oxígeno durante tiempos relativamente largos de residencia, que pueden ir de varios minutos a varias horas (Mohan *et al.*, 2006). En este proceso el calentamiento requiere temperaturas desde 300 a 700° C, para alcanzar temperaturas promedio alrededor de 500 °C (Brown, 2009). Existen reactores modernos para la pirólisis lenta como son los pirolizadores tipo tambor los hornos rotatorios o los pirolizadores de tornillo (Bruun *et al.*, 2012). La pirólisis lenta produce dos tipos de productos, biocarbón y syngas, aunque algunos sistemas también pueden producir aceite pirolítico (bio-oil). Hay rendimientos altos de biocarbón con pirólisis lenta al usar materias primas con elevado contenido de lignina y a temperaturas de aproximadamente 500 °C (Shoi *et al.*, 2010). Esta temperatura permite minimizar el riesgo de producir dioxinas e hidrocarburos poliaromáticos perjudiciales, que pueden contaminar el biocarbón, o formar parte de los gases y residuos sólidos o líquidos. Demirbas (2008) reporta que los rendimientos máximos de biocarbón se dan a temperaturas y velocidades de calentamiento bajas. Por otra parte, los tiempos de residencia largos en el proceso de pirólisis conducen a obtener biocarbón casi totalmente pirolizado, con menos carbono volátil y, por lo tanto, se presume que hay menos riesgos de causar inmovilización de nitrógeno (Bruun *et al.*, 2012). La pirólisis de baja temperatura da un material más rico en carbono aromático y sustancias húmicas, que mejora las propiedades del carbón o la ceniza y los hace más deseables para el suelo. Arteaga-Crespo *et al.* (2012) desarrollaron un proceso de pirólisis con velocidades de calentamiento de entre 5 y 15 °C

min⁻¹ a temperaturas tan bajas como 300 °C, con ello obtuvieron rendimientos de biocarbón mayores que para temperaturas menores y velocidad de calentamiento mayor. También determinaron que a temperaturas elevadas no resulta significativa la velocidad de calentamiento en el proceso de pirólisis.

Pirólisis rápida (FP)

Es más complicada que la pirólisis lenta ya que incluye un proceso continuo optimizado para producir biocombustible. El material orgánico en cantidades pequeñas se sopla en un reactor caliente (450-600 °C) en cámaras libres de oxígeno, y se expone a transferencia de calor por tiempos que van de algunos milisegundos a varios segundos. Estos sistemas requieren partículas muy pequeñas que permiten una rápida transferencia de calor (Sohi *et al.*, 2010). Las tecnologías de pirólisis rápida existentes comprenden los sistemas de lecho fluidizado, los reactores para pirólisis ablativa y los reactores de centrifuga (PCR) (Bruun *et al.*, 2012). En la pirólisis rápida, el *bio-oil* y el *syngas* son los productos principales, que se favorecen con materias primas con alto contenido de celulosa y hemicelulosa, y producen una cantidad menor de biocarbón (Sohi *et al.*, 2009). Los rendimientos de productos líquidos se maximizan en condiciones de baja temperatura, alta velocidad de calentamiento y corto tiempo de residencia del gas. Mientras que los rendimientos de gas combustible se maximizan cuando se aplica temperatura alta, tasa de velocidad de calentamiento baja y tiempo de residencia largo. Sin embargo, una pirólisis rápida a bajas temperaturas, o en la que se usan partículas de materia prima de tamaño grande, puede dar como resultado una pirolización incompleta de la biomasa, liberar carbono disponible para la población microbiana y, por lo tanto, un potencial reducido para el secuestro de carbono en el suelo (Bruun *et al.*, 2012). Algo que se tiene que considerar al emplear el biocarbón generado en

este tipo de pirólisis es que puede causar inmovilización de nitrógeno cuando se aplica directamente al suelo, lo que puede afectar el desarrollo de microorganismos (Laird *et al.*, 2009; Brewer *et al.*, 2009).

.....Pirólisis de destello (*flash pyrolysis*)

En este proceso la biomasa se calienta durante al menos dos segundos para producir bioaceite líquido y quedando retenido el 60% del carbono en esta biomasa (Maschio *et al.*, 1992). Este es un proceso que se lleva a cabo a temperaturas de alrededor 500 °C. Los rendimientos de líquidos en este proceso son altos hasta 75% en peso. Los productos resultantes tienen varios usos, entre ellos como portadores eficientes de energía (Bridgwater, 2012).

Materias primas para elaborar los biocarbones

Hay varios tipos de residuos usados para generar biocarbón: rastrojo de maíz (*Zea mays* L.) (Yuan *et al.*, 2011), tallo de soya (*Glycine max* L.), cáscara de maní (*Arachis hypogaea* L.) (Brewer *et al.*, 2009), canola (*Brassica campestris* L.) (Asai *et al.*, 2009), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum* spp), cáscara de coco (*Cocos nucifera*) (Tsai *et al.*, 2006), pasto (*Miscanthus giganteus*) (Luo *et al.*, 2011). También se usan estiércoles de animales, y Rajkovich *et al.*, en 2012 usaron uno proveniente de aves de corral. Además se utilizan residuos urbanos como restos de alimentos y desechos de papel (Rajkovich *et al.*, 2012). Muchos biocarbones se producen de residuos provenientes de árboles forestales como, roble (*Quercus robur*), pino (*Pinus* sp) y (*Pinus radiata*) (Taghizadeh-Toosi *et al.*, 2011), eucalipto (*Eucalyptus deglupta*; DeLuca *et al.*, 2006; Rondon *et al.*, 2007), avellana (*Corylus avellana*), teca (*Tectona grandis* L.), y palo de rosa (*Pterocarpus macrocarpus* Kurz) (Asai *et al.*, 2009), residuos de podas, árboles afectados

por plagas, hojarasca, y corteza de árbol. Residuos que han sido menos utilizados son la cáscara de arroz; los residuos de aceituna para aceite, las cáscaras secas de café, las nueces, el estiércol de bovinos, los desperdicios de la industria de pulpa de papel. Además, con mucha frecuencia se usan biocarbones de aserrín y de virutas de madera; estos materiales, al contener mayor cantidad de carbono fijado en la biomasa que otros residuos, presentan un alto potencial para capturar carbono (Lehmann, 2007). En el mundo se producen aproximadamente 2802×10^6 Mg al año de cereales y 3758×10^6 Mg al año de 27 cultivos usados para la alimentación (Lal, 2005). Si éstos se usaran para producir biocarbón, serían una fuente casi inagotable que contribuiría de manera importante a dar un valor agregado a estos materiales. A pesar de la abundancia de residuos agrícolas, se debe tener cuidado al seleccionar los residuos para la producción del biocarbón: los residuos deben ser muy abundantes y por representar un potencial problema ambiental y a la salud, deben tener características físicas que permitan lograr eficiencia en el proceso de pirólisis, representar un beneficio económico para quienes intervienen en el proceso de producción, y además generar biocarbones con usos que permitan obtener beneficios, como mejorar la calidad del suelo o el reducir CO_2 , que es un gas de efecto invernadero. En el futuro, la selección de la materia prima deberá dictarse por el equilibrio que se desee entre los productos de la pirólisis (gas, bio-aceite y biocarbón), ya sea con pirólisis lenta o rápida (Sohi *et al.*, 2009), y el uso de los mismos. Algunos factores que afectan la eficiencia de la producción son los tamaños de las partículas y el contenido de humedad de la materia prima. Las materias primas húmedas, con granulometrías grandes, requieren más energía para su pirólisis, por lo tanto se transforma una menor cantidad a biocarbón y otros productos como bio-aceite y gas (Kwapinski *et al.*, 2010) y, además, otros factores como la temperatura, los tiempos de residencia, y la naturaleza del material usado para obtener el biocarbón.

Usos del biocarbón

El biocarbón tiene muchas aplicaciones en el campo de la agricultura, actualmente se ha utilizado principalmente: a) para mejorar la calidad del suelo (propiedades físicas, químicas y biológicas) y el desarrollo de los cultivo (Lehmann *et al.*, 2006; Winsley, 2007), b) para retener contaminantes como metales pesados, hidrocarburos, etc. en suelos y sedimentos (Koelmans *et al.*, 2006; Bornemann *et al.*, 2007; Hua *et al.*, 2009) y c) con propósitos de capturar CO₂ y otros gases efecto invernadero en el suelo (Lehmann *et al.*, 2006; Winsley, 2007).

El biocarbón ha ganado recientemente la atención por ser un residuo rico en nutrientes que quedan después de la pirólisis (Nguyen *et al.*, 2004; Lehmann *et al.*, 2006; Winsley, 2007). Como mejorador del suelo puede aumentar la capacidad de intercambio catiónico y neutralizar el pH, además favorecer el desarrollo de microorganismos (Lehmann y Roldan 2006; Hockaday *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2008). Conduce a cambios en las propiedades físicas del suelo como la textura, la estructura, la consistencia y la porosidad (Downie *et al.*, 2009). Puede estimular la mineralización y la nitrificación (Berglund *et al.*, 2004; Wardle *et al.*, 2008). Altos contenidos de nutrientes provenientes de biocarbones de maderas pueden quedar inmovilizados durante la vida del árbol (Gaskin *et al.*, 2010). Se ha demostrado que debido a que posee una gran superficie específica tiene una alta capacidad para sorber contaminantes en suelos y sedimentos (Bornemann *et al.*, 2007; Hua *et al.*, 2009).

El biocarbón se ha propuesto como parte de los mecanismos que contribuyen a mitigar los impactos negativos sobre el medio ambiente. Lehmann *et al.* (2006) estiman que el biocarbón de residuos de la silvicultura y agricultura tiene un potencial global de la retención del carbono de 0.16 Pg año⁻¹ y que hasta el 70% del carbono queda fijado en el biocarbón. Por ejemplo: una

tonelada de biocarbón de bagazo de caña podría secuestrar hasta 2.3 Mg de CO₂ equivalente (Quirk *et al.*, 2012). El tiempo promedio de residencia de carbono en el suelo para el biocarbón enterrado es al menos 1000 años o posiblemente más tiempo (Nguyen y Lehmann, 2009) y, según Sohi *et al.* (2009) el biocarbón puede permanecer en el suelo siglos e incluso milenios.

Gaunt y Lehmann (2008) usaron un enfoque de ciclo de vida para evaluar sistemas diseñados exclusivamente para producir energía, y compararon éstos con sistemas que producen energía y biocarbón a partir de la pirólisis. Sus resultados mostraron que la aplicación de biocarbón a tierras agrícolas (2–19 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹) evita emisiones de GEI de 2 a 5 veces más que si se usará el biocarbón exclusivamente para compensar energía fósil. Entre 41 y 64% de la reducción de emisiones se acreditaron a la retención del carbono en el biocarbón. Estos mismos autores indican que al usar biocarbón para producir electricidad, las emisiones de carbono por MWh⁻¹ van desde 91 a 360 kg CO₂ MWh⁻¹, cifras considerablemente menores a las de las emisiones asociadas al ciclo de vida del uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad (600–900 kg CO₂ MWh⁻¹). La energía producida por unidad de consumo de energía fue de 2–7 MJ⁻¹ valor mayor al de otras tecnologías comparables como las de etanol de maíz (Quirk *et al.*, 2012).

Aserrín

En México se procesan alrededor de 8 millones de m³ de madera, de la cual el 70% se destina a la industria del aserrío, generando 2 800 000 m³ de aserrín (Cruz, 2012). En un estudio realizado en aserraderos de Durango (México) se indica que en el aprovechamiento forestal se obtiene un promedio de 7.95% de aserrín por cada 35.75% de residuos (tiras, recortes y costeras, con corteza) dando un total 43.7% del volumen total de madera en rollo, lo que equivale a un alto

valor de residuos (Cruz, 2012). Estos provienen tanto del aserradero como de la remanufactura de la madera, así como también de las podas y los raleos de los bosques (Manzanares, 2007).

El aserrín es el residuo más generado en los aserraderos, sea este producto del manejo convencional o automático. Es un subproducto industrial derivado de las industrias primaria (aserraderos, fábricas de tableros de partículas, plantas de fabricación de pasta de papel) y secundaria (ebanistería, carpintería) de la madera (Reyes, 2013). Los aserraderos han considerado los residuos de madera (biomasa) como un subproducto complejo de la operación de aserrío. En México, la mayor parte de los residuos de madera se convierten en desechos sólidos o basura. En los países Latinoamericanos es común que los subproductos forestales no se aprovechen en su totalidad (Sotos y Núñez, 2008).

Los residuos de madera se consideran como una de las mayores complicaciones en el sector forestal, no sólo por los costos que demanda su almacenamiento o disposición que debe ser rápida, sino porque además son causantes de contaminación ambiental (Reyes Cortés, 2013). Además al contacto del humano con residuos de madera se asocian problemas de salud son asma, bronquitis crónica y otras afecciones respiratorias como alergias (Starbuck, 1997), dermatitis (Malström *et al.* 1999) y cánceres pulmonares, gastrointestinales y nasales (Seguros de Texas, 2004). Por otra parte, la acumulación del aserrín, al ser un producto estable, representa un problema serio de contaminación ambiental en los suelos (Starbuck, 1997) y ecosistemas donde se deposita. La degradación natural de los residuos es lenta, la reducción del espacio disponible en los centros de elaboración de madera, el detrimento a la salud de los trabajadores y vecinos de los aserraderos, los riesgos ambientales por incendios y autocombustión, y las condiciones para la propagación de plagas y enfermedades (especialmente hongos de los géneros *Fomes*, *Schizophyllum* y *Polyporus*), en amerita centrar la atención en alternativas de manejo más

amigables con el ambiente y que generen valor agregado para la actividad reforestada (Sarmiento, 2011).

El destino de los diferentes residuos no es el más racional, se eliminan usándolos como relleno de terrenos, se venden o regalan a empresas que les dan uso, en ocasiones se envían a vertederos o se incineran indiscriminadamente. Como medida de control para la calidad del ambiente, existe una regulación federal que prohíbe la quema del aserrín, entonces estos, se vende a precios mínimos, o bien se tira en forma clandestina para evitar su acumulación (Mateo, 2002). La incineración es una técnica derrochadora, ya que la materia orgánica es rica en nutrientes y su destino final debe ser el retorno al suelo para mantener su fertilidad (Reyes Cortés, 2013).

El aserrín tiene ciertas aplicaciones en la producción de tabique, combustible, cama para corrales, compost y producción de papel de baja calidad, sin embargo su uso es limitado. En Ecuador se da el aprovechamiento del aserrín en la industria de los bloques prefabricados dado que la densidad de la madera, es menor a la de la piedra triturada, y tiene capacidad de absorber el ruido, retener calor y mantener el clima en un ambiente, por lo que representan un aporte en los aspectos técnico, económico y ambiental a la industria de la construcción (Mateo, 2002). La industria químico-forestal, utiliza aserrín como materia prima en la industria del alcohol, levadura forrajera furfural y más recientemente suplementos alimenticios carbohidratos, minerales y/o proteicos para la alimentación animal (Reyes-Cortés, 2013). En la actualidad, se ha buscado reducir este tipo de residuos, haciendo uso de biotecnologías que proporcionen métodos que tiendan a reducir su volumen, y para ello se han estudiado principalmente hongos filamentosos como el *Aspergillus niger* que produce gran cantidad de enzimas entre las que se

encuentran las glucanasas, empleadas en la degradación de la celulosa, asimismo crece en casi cualquier fuente de carbono, lo que facilita su producción a gran escala (Amaya *et al.*, 2010).

Los residuos madereros también se usan para elaborar pellets o briquetas, conocidos como biocombustibles sólidos densificados. Estos pellets son una alternativa al uso de combustibles y además es más atractiva ambientalmente debido a que disminuyen las emanaciones de CO₂ en un 50% comparado con la combustión de leña o astillas, contribuye también a disminuir las concentraciones de gases causantes del “efecto invernadero” y el cambio climático como SO_x y NO_x (Soto y Núñez, 2008). En consecuencia, disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente.

A diferencia de la mayor parte de las otras industrias, la forestal tiene la ventaja de poder utilizar sus residuos para contribuir a cubrir sus necesidades energéticas. En el tratamiento mecánico de la madera, la mayor parte de sus necesidades de energía térmica pueden atenderse con los residuos disponibles; es más, la industria del aserrío tiene las posibilidades de producir un excedente de calor y electricidad y, por lo tanto podría también, en las zonas rurales, suministrar energía para las necesidades de la comunidad (Saade *et al.*, 2006). En el poblado de Madera, en la sierra de Chihuahua, México, se ha instalado desde hace unos meses una planta que transforma los desechos forestales (ramas y hojas que se desprenden de árboles y aserrín) en carbón activado. El carbón activado es un producto con alto valor agregado y cada tonelada de las que se están produciendo su precio de venta oscila entre \$ 18.50 M.N a \$36.00 M.N, de acuerdo a la calidad del producto (Crónica, 2013).

Bagazo y paja de la caña de azúcar

México es el séptimo productor de azúcar en el mundo y la agroindustria cañera es la más antigua del país. Su cultivo a nivel nacional ocupa el séptimo lugar como cultivo perenne, con una superficie sembrada de 683 008 mil ha y una producción de 42.5-50 millones de toneladas de caña al año, las que se procesan en 57 ingenios distribuidos en quince estados de la República. En los últimos 5 años se reportó una producción de entre 4.9-5.2 millones de toneladas de azúcar, que generaron alrededor de 3 millones de empleos, 450 mil directos y 2.2 millones indirectos, y es el sustento de casi 5 mil familias campesinas por ingenio en promedio (Bravo y Cortés, 2009; García *et al.*, 2011). De acuerdo al reporte de García *et al.* (2011) esta actividad generó entre 2008-2009 el 2.5% del PIB del sector industrial. Es por ello que esta industria es considerada de interés público y como un importante detonador del desarrollo económico regional. Sin embargo, a lo largo de la historia económica de México esta agroindustria ha venido registrando grandes rezagos tecnológicos en los últimos 50 años, tanto en campo como en fábrica, mismos que tienden a agravarse frente a la competitividad internacional (Bravo y Cortés, 2009).

La producción de caña y la industria azucarera generan importantes beneficios pero a la vez crea problemas ambientales importantes: a) el manejo de los residuos que quedan en el campo después de la cosecha; b) la quema programada de la caña como práctica previa a cosechar los tallos, lo que facilita el corte, reduce la materia extraña a nivel de la industria y facilita la extracción de sacarosa, pero que produce serios problemas de contaminación; c) el manejo del bagazo después de la molienda de la caña. Los residuos que quedan en el campo cañero varían de 16 a 30 toneladas por hectárea (Toledo *et al.*, 2008), el bagazo que se queda por cada tonelada procesada de tallo es de 250 a 400 kg (Hernández *et al.*, 2008).

La práctica de la quema del follaje y de paja de la caña de azúcar ha sido considerada como inapropiada en el marco de la sustentabilidad y la ecología (Mendoza *et al.*, 2001) porque provoca problemas de diversa índole (Toledo *et al.*, 2005; Wiedenfield, 2009; França *et al.*, 2012) : a) ambientales como contaminación del suelo, aire, agua y masa orgánica; b) económicos porque restringen la búsqueda de usos alternativos y rentables para la paja; c) técnicos porque se limita y obstaculiza la generación de tecnología; d) sociales debido a que ha impedido generar nuevas oportunidades de negocios y de trabajo dándole uso a los residuos (Ortiz *et al.*, 2012); e) sanitarios como generador de enfermedades, tanto para el mismo cultivo como para los trabajadores cañeros (Basanta *et al.*, 2007), además de la pérdida de nutrientes al ser los residuos retirados en los tallos o quemados en el campo (Hernández *et al.*, 2008).

Por lo anterior, urge instituir reglas más estrictas para el uso de la quema como práctica de pre cosecha, incluso llegar al extremo de su prohibición. En concordancia, esas medidas deben mejorar los ingresos de los cortadores que deciden cosechar caña cruda, así como desarrollar metodologías para el manejo, el destino o uso de los abundantes residuos dejados en el campo (Ortiz *et al.*, 2012). Incluso, es importante determinar la cantidad adecuada de paja que debe permanecer e incorporarse al suelo para mejorar su estructura, fertilidad e incrementar el contenido de materia orgánica en lugar de quemarla. Con estas y otras medidas, los beneficiados en el largo plazo en el aspecto económico serían los productores cañeros, quienes recibirían un ingreso adicional al que perciben actualmente por el solo rendimiento de tallos quemados (Ortiz *et al.*, 2012). Además, la paja que queda en el terreno puede tener otros propósitos como alimento animal, fuente de bioenergía, etc., que en diferentes ambientes agroecológicos dependerá de la variedad de la caña, los niveles de productividad, las fechas de cosecha y la eficiencia de la cosechadora en el corte, levante y limpieza (Ortiz *et al.*, 2012).

El bagazo es el residuo del proceso de fabricación del azúcar a partir de la caña, el remanente de los tallos de la caña después de ser extraído el jugo azucarado que ésta contiene. El bagazo está constituido por cuatro fracciones: fibra o bagazo (45%), sólidos no solubles (2-3%), sólidos solubles (2-3%) y agua (49 -51%) (Aguilar *et al.*, 2011). La fibra del bagazo es un material lignocelulósico complejo que consiste principalmente de 50% celulosa, 25% hemicelulosa y 25% lignina, y otros componentes como pentosanos. Los compuestos inorgánicos se refieren como ceniza (Pandey *et al.*, 2000). La fibra está compuesta de elementos estructurales que pueden ser utilizados por la industria de pulpa y papel, de hecho el bagazo de caña es la mayor fuente de fibra para la industria de pulpa y papel en México. Las pulpas de bagazo se emplean en la mayoría de los grados de papel: escritura, toallas e higiénico (Aguilar *et al.*, 2011). Su empleo en la manufactura de papel inició hace más de 150 años además con la fabricación de paneles aglomerados de fibras y de partículas.

El bagazo de caña también tiene otros usos. Investigadores del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca, han utilizado bagazo para sustituir parcialmente al cemento y producir gran variedad de materiales que se utilizan en la industria de la construcción, que mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto (La Jornada, 2014). La celulosa también se emplea para derivados farmacéuticos y aditivos de alimentos (Aguilar *et al.*, 2011). Los coproductos y subproductos de la agroindustria azucarera (sacarosa, melazas, bagazo, cachazas y vinazas) sirven como insumo para las industrias que fabrican refrescos y bebidas, jugos, néctares, galletera, repostería, licores, tableros aglomerados, alimentos pecuarios entre otros usos, contribuyendo al desarrollo industrial del país (PRONAC, 2007, Zafranet, 2008). Se ha empleado el bagazo de caña tradicionalmente en los países azucareros como materia prima para la producción de energía en

las calderas de los ingenios o centrales azucareras, o para la extracción de subproductos como alcohol. Más recientemente, el bagazo de caña de azúcar se ha usado para la bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo (García *et al.*, 2011). En México ya existen programas que apoyan la construcción de biodigestores y generadores, el primer cogenerador eléctrico a base de bagazo de caña ya ha sido instalado, con reducciones estimadas de 3.6 Mt CO₂ eq (García *et al.*, 2011).

La biomasa lignocelulósica, como el bagazo de caña de azúcar, residual en la industria del azúcar-etanol, permite la posible integración de producción de biocombustibles de primera y segunda generación (Du *et al.*, 2008). La producción de biocombustibles a través de tecnologías de segunda generación ha generado polémica al definir qué debe priorizarse, la producción de alimento o la generación de combustibles, además de preocupaciones socio-económicas (Hayes, 2008). Terrenos no aptos para la producción de alimentos pueden ser utilizados para producir cultivos energéticos lignocelulósicos. Por lo tanto, los residuos agrícolas que no son utilizados para la producción de alimentos para humanos, como lo es la biomasa lignocelulósica, son una alternativa de integración de procesos de masa y energía que puede generar ahorro de materias primas (Du *et al.*, 2008).

Existen dos estrategias posibles para el aprovechamiento de la biomasa residual de la caña de azúcar y los subproductos. La primera de ellas consiste en desarrollar, a partir de ella, derivados que se puedan insertar en las cadenas de producción y mercados ya existentes, como la panela, el ron etc. La segunda, implica el desarrollo de nuevas tecnologías de aprovechamiento de los propios residuos, las cuales se centran en cuatro direcciones básicas: a) obtención de energía, b) obtención de productos químicos, c) reciclado en la actividad agrícola y d) utilización en la alimentación ganadera (Aguilar *et al.*, 2009). La Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de

Azúcar señala en su Artículo 115 que *se impulsará el aprovechamiento de la biomasa residual de la caña de azúcar, particularmente los procesos de gasificación o termólisis, apoyando aquellos proyectos que demuestren la rentabilidad sustentable.* (México. Presidencia de la República, 2005).

Como residuo agrícola, el bagazo es una biomasa rica en carbono y muy abundante. Se han realizado varios estudios para explorar el potencial de producción de biocombustibles o biocarbón de bagazo mediante pirólisis (Mothe y Miranda, 2009). La digestión anaeróbica del bagazo podría ser una fuente adicional de los biocombustibles pero la hidrólisis y la cristalinidad de la celulosa limita el proceso de digestión, lo que afecta la viabilidad biogásificante de bagazo de caña de azúcar para la producción de biocombustibles (Inyang *et al.*, 2010). En el Ingenio Santa Clara mostraron que 3.5 t de paja tienen el mismo poder calórico que 1.0 t de combustóleo, por lo que la sustitución de este último significa un ahorro de \$900.00 M.N, lo que muestra una opción para reducir el uso de combustibles fósiles (CAÑAMEX, 2007). Otros usos pueden ser a través de la pirólisis con lo cual es posible generar 1 Mwh de electricidad por cada 2 Mg de paja seca y recuperar 31% en forma de biocarbón (Quirk *et al.*, 2012); resaltando que el carbono en el biocarbón es estable y al usarlo como mejorador del suelo resulta también un secuestrador de carbono de la atmósfera; además la paja, puede ser usada para papel rústico (Garnica *et al.*, 2007).

Por otro lado, los residuos obtenidos de la digestión anaerobia se aplican directamente como abono en suelos. Pero la creciente preocupación sobre el potencial de contaminación de la cadena alimenticia de los oligoelementos tóxicos que contiene ha requerido de métodos alternativos de reciclado. Es por ello que la pirólisis del residuo de bagazo digerido anaeróbicamente se ha propuesto como un producto para producir biocarbón y que

potencialmente pueda mejorar la calidad del suelo, servir como una barrera de remediación contaminante o un absorbente de bajo costo para eliminar los contaminantes de las aguas residuales (Inyang *et al.*, 2010).

Aspectos económicos de la producción de biocarbón

El grado del desarrollo de los mercados del biocarbón, dependerá de muchos factores asociados con su costo de producción, así como con la efectividad del biocarbón en los usos previstos. La pregunta es ¿Qué sería económicamente más valioso: usar el biocarbón como enmienda del suelo o para la producción de energía? Por ejemplo, podría ser económicamente más atractivo quemarlo para generar energía (es decir, como sustituto del carbón) si el contenido de energía del biocarbón es alto. Sin embargo, en este caso se pierden los beneficios al ser aplicado al suelo, como el aumento de la productividad agrícola y los pagos por secuestro de carbono (Galinato *et al.*, 2011). Otros usos posibles de biocarbón son como precursor de carbón activado, comúnmente utilizado en el proceso de filtración industrial, en el tratamiento de aguas residuales municipales y sistemas de aire filtrado, como fuente de energía, como combustible para alimentar el proceso de pirólisis, como materia prima de gasificadores (Galinato *et al.*, 2011). También como enmienda en campos agrícolas y fuera de la agricultura en huertos urbanos, jardines, parques y campos deportivos (Galinato *et al.*, 2011).

CONCLUSIÓN

El aserrín de madera y el bagazo de caña son dos de los residuos orgánicos más importantes en volumen que se generan en nuestro país, por la magnitud de su producción agrícola y su transformación industrial. Sin embargo, actualmente una parte importante de estos residuos se manejan mal pues se desechan en forma de basura, se queman o acumulan de forma irregular, en lugares incorrectos y se convierten así en una fuente de contaminación y un desperdicio de recursos. El buen manejo, la adecuada disposición, el reciclado y el uso alternativo de aserrín y bagazo ayuda a reducir problemas ambientales de contaminación de suelo, agua y aire, además de generar fuentes alternativas de producción y empleo. Una de las alternativas más viables y benéficas para la sociedad es la transformación del bagazo de caña y el aserrín de madera en biocarbón.

El biocarbón es producto de un proceso denominado Sistema Biocarbón-Pirólisis (PBS), que hace que la materia orgánica de los residuos agrícolas se transforme en un producto semi carbonizado sólido y poroso que tiene características físicas y químicas muy favorables a diferentes usos.

El aserrín de madera y el bagazo de caña pueden tener múltiples usos que permiten contribuir a mejorar el medio ambiente, la conservación de recursos, la generación de valor a partir de su transformación en subproductos y el mejoramiento del bienestar de la población.

LITERATURA CITADA

- Aguilar, R. N. 2011. Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. Ing. Inv. Tecnol. XII (1): 189-197.
- Aguilar, R. N., G. M. Galindo, J. M. Fortanelli, y C. S. Contreras. 2009. ¿Por qué diversificar la agroindustria azucarera en México? GCG Georgetown University –Universia. 3 (1):62-74.
- Amaya, L. I. Y., J. F. González, R. M. Pérez, y I. A. Rodríguez. 2010. Revista Salud Pública y Nutrición. Edición Especial. No. 1. Congreso Internacional de QFB, 2009. Monterrey, Nuevo León, México.
- Amonette, J., and S. Joseph. 2009. Characteristics of biocarbón: Micro-chemical properties. In: Lehmann, J., and S. Joseph (eds). Biocarbón for Environmental Management, Earthscan. London. pp: 35–54.
- Arteaga-Crespo, Y., L. R. Carballo-Abreu, Y. García-Quintana, M. Alonso-López, y G. Geada-López. 2012. Caracterización del aserrín de *Acacia mangium* Willd para la obtención de biocarbón. Rev. latinoam. ambient. cienc. 8 (2): 90-95.
- Asai, H., B. K. Samson, H. M. Stephan, K. Songyikhangsuthor, K. Homma, Y. Kiyono, Y. Inoue, T. Shiraiwa, and T. Horie. 2009. Biocarbón amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. Field Crop Res. 111: 81-84.
- Basanta, R., M. D. García, J. M. Cervantes, H. V. Mata, y G. V. Busto. 2007. Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión. Cienc. Tecnol. Aliment. 5(004): 293-305.
- Berglund, L.M., T. H. DeLuca, and O. Zackrisson. 2004. Activated carbon amendments to soil alter nitrification rates in Scots pine forests. Soil Biol. Biochem. 36: 067-2073.
- Biederman, L.A., and W.S. Harpole. 2013. Biocarbón and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. GCB Bioenerg. 5: 202–214.
- Bornemann, L.C., R.S. Kookana, and G. Welp. 2007. Differential sorption behaviour of aromatic hydrocarbons on charcoals prepared at different temperatures from grass and wood. Chemosphere. 67:1033–1042.
- Bravo, R. y R.G. Cortés. 2009. Producción de biocombustibles en México: la caña de azúcar. Rev. Divulg. Científica Tecnol. Universidad Veracruzana vol. XXII núm. 1. Disponible en línea: <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol22num1/articulos/produccion/index.html>
- Brewer, C. E., R. K. Schmidt, J.A. Satrio, and R.C. Brown. 2009. Characterization of biocarbón from fast pyrolysis and gasification systems. Environ. Prog. Sustain. Energy. 28: 386-396.

- Bridgwater, A.V. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass. Bioenergy*. 38: 68-94.
- Brown, R. 2009. Biocarbón production technology. In: *Biocarbón for environmental management: Sci. Technol.*, Eds. Lehmann, J., Joseph, S. London: Earthscan Publications Ltd.
- Bruun, E. W., P. Ambus, H. Egsgaard, and H. Hauggaard-Nielsen. 2012. Effects of slow and fast pyrolysis biocarbón on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 46:73- 79.
- CAÑAMEX. 2007. Aprovechamiento y rentabilidad de los residuos de cosecha de la caña de azúcar. Cañaverales Mexicanos SPR de RL de CV-Ingenio Santa Clara SA de CV. Informe Técnico. 20 p.
- Cheng, C.H., J. Lehmann, and M. Engelhard. 2008. Natural oxidation of black carbon in soil: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 72: 1598-1610.
- Crónica. 2013. Crean planta para producir carbón activado con desechos forestales. Adrián Figueroa. (Consulta 02 octubre 2014). Disponible en línea: <http://www.cronica.com.mx/notas/2012/691960.html>
- DeLuca, T.H., M.D.MacKenzie, M.J. Gundale, W.E. Holben. 2006. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in Ponderosa pine forests. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:448–453.
- Demirbas, A. 2008. Producing bio-oil from olive cake by fast pyrolysis. *Energ. Source.* 30(Part A), 38–44.
- Downie, A., A. Crosky, and P. Munroe. 2009. Physical Properties of Biocarbón. *In: Lehmann, J., Joseph, S (Ed.). Biocarbón for environmental management: Sci. Technol.* 1. Londres: Earthscan. pp: 416.
- Du, C., S. Lin, A. Koutinas, R. Wang, P. Dorado, and C. Webb. 2008. A wheat biorefining strategy based on solid-state fermentation for fermentative production of succinic acid. *Bioresour. Technol.* 99: 8310–8315.
- Franca, D. de A., K. M. Longo, S. Gomes, N. T. Santos, J. C. Freitas, S. R. Rudorff, B. F. T. Vieira C., E. E. Anselmo and C. J. J. Andrade. 2012. Pre-harvest sugarcane burning: Determination of emission factors through laboratory measurements. *Atmosphere.* 3:164-180.
- Galinato, S. P., J. K. Yoder, and D. Granatstein. 2011. The economic value of biocarbón in crop production and carbon sequestration. *Energ. Policy.* 39: 6344–6350.
- García, C. A., A. Fuentes, A. Hennecke, E. Riegelhaupt, F. Manzini, and O. Masera. 2011. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Appl Energy.* 88: 2088–2097.

- García, T., R., E.L. Ríos, A.T. Martínez, F. R. M. Ramos, J. S. C. Sánchez, y M. del C. C. Díaz. 2011. Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado. *Rev. Int. Contam. Ambiental.* 27 (1):31-39.
- Garnica, G.M.J., R.M. Arias, R.A. Martín, y M.A. Sanz. 2007. Fabricación manual de papel con fibras vegetales. *Revista Digital Práctica Docente.* 7:369-380.
- Gaskin, J.W., C. Steiner, K. Harris, K.C. Das, and B. Bibens. 2010. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biocarbón for agricultural use. *Transactions of the ASABE.* 51(6): 2061–2069.
- Gaunt, J. L. and J. Lehmann. 2008. Energy Balance and Emissions Associated with Biocarbón Sequestration and Pyrolysis Bioenergy Production. *Environ. Sci. Technol.* 42: 4152–4158.
- Hayes, D.J. 2008. An examination of biorefining processes, catalysts and challenges. *Catalysis Today.*145: 138–151.
- Hernández, G.I., S. Salgado, D. Palma, L. del C. Lagunes, M. Castelán, O. Ruiz. 2008. Vinaza y composta de cachaza como fuente de nutrientes en caña de azúcar en un Gleysol mólico de Chiapas, México. *Interciencia.* 33: 855-860.
- Hockaday, W.C., A.M. Grannas, S. Kim, and P.G. Hatcher. 2007. The transformation and mobility of charcoal in a fire-impacted watershed. *Geochim. Cosmochim. Acta.*71(34) 3432-3445.
- Hua, L., W.X. Wu, Y.X. Liu, M. McBride, and Y.X. Chen. 2009. Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Environ Sci. Pollut. R.* 16: 1-9.
- Inyang, M., G. Bin, P. Pratap, D. Wenchuan, R. Z. Andrew. 2010. Biocarbón from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresour. Technol.* 101: 8868–8872.
- Koelmans, A.A, M.T.O. Jonker, G. Cornelissen, T.D. Bucheli, P.C.M. Van Noort, and Ö. Gustafsson. 2006. Black carbon: the reverse of its dark side. *Chemosphere.* 63: 365-377.
- Kwapinski, W., B C. M. Pyrne, E. Kryachko, P. Wolfram, C. Adley, J. J. Leahy, E. H. Novotny and M. H. B. Hayes. 2010. Biocarbón from Biomass and Waste. *Waste Biomass Valor.* 1:177–189.
- La Jornada.2014. Estudia IPN el uso de bagazo de caña para hacer concreto hidráulico. (Consulta: febrero 2014).En línea <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2014/02/06/bagazo-de-cana-posible-componente-de-concreto-hidraulico-4963.html>
- Laird, D.A., R.C.Brown, J.E. Amonette, and J. Lehmann. 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biocarbón. *Biofuel. Bioprod. Bior.* 3: 547-562.

- Lal, R. 2005. World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environ. Int.* 31: 575–584.
- Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Front. Ecol. Environ.* 5(7): 381–387.
- Lehmann, J., J. Gaunt, and M. Rondón. 2006. Biocarbón Secuestration in terrestrial ecosystems a review. *Mitigation and adaptation strategies for Global Change. J. Atmos. Sci.* 11: 403-427.
- Lehmann, J. and M. Rondon. 2006. Bio Char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. *In: N. Uphoff , A.S. Ball, E. Fernandes, H.Herren, O. Husson, M.Laing, C. Palm, J. Pretty, P. Sanchez, N.Sanginga and J. Thies (eds.). Biological approaches to sustainable soil systems. Florida: CRC Press, Taylor and Francis Group. Boca, Raton, FL. P. 517–530.*
- Luo, Y., M. Durenkamp, M. De Nobili, Q. Lin, and P.C. Brookes. 2011. Short term soil priming effects and the mineralization of biocarbón following its incorporation to soils of different pH. *Soil Biol. Biochem.* 43:2304–2314.
- Malström, K., J. Savolainen, and E. O. Terho. 1999. Allergic alveolitis from pine sawdust. *Ann Allergy Asthma Immunol.* 54: 526-533.
- Manya, J. J. 2012. Pyrolysis for biocarbón purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ. Sci. Technol.* 15: 7939–7954.
- Manzanares, K., D. Velázquez y M.A. Guyat. 2007. Experiencia del aprovechamiento de los residuos en un aserrío. *Ciencia e Investigación Forestal. Instituto Forestal Chile. Instituto de Investigaciones Forestales. Cuba. 10 p.*
- Maschio, G., C. Koufopanos and A. Lucchesi. 1992. Pyrolysis, a promising route for biomass utilization. *Bioresour. Technol.* 42: 219– 231.
- Mateo, J. M. 2002. Potencial del aserrín como alimento para rumiantes y sustrato para plantas. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 92 p.
- Mendoza, T. C., R. Samson, and T. Helwig. 2001. Evaluating the many benefits of sugarcane trash farming systems. *Philippine J. Crop Sci.* 27(1):43-51.
- México. Presidencia de la República. 2005. Ley de Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. Publicada en el DOF el 22 de Agosto de 2005.
- Mohan, D., C.U. Jr. Pittman, P.H. Steele. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels.* 20:848-889.
- Mohan, D., Pittman, C.U., and P.H. Steele. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy Fuels.* 20: 848-889.

- Mothe, C.G., I.C. de Miranda. 2009. Characterization of sugarcane and coconut fibers by thermal analysis and FTIR. *J. Therm. Anal. Calorim.* 97: 661–665.
- Nguyen, B. T., and J. Lehmann. 2009. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Org. Geochem.* 40(8): 846-853.
- Nguyen, T.H., R.A. Brown, and W.P. Ball. 2004. An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel soot, wood char, and sediment. *Org. Geochem.* 35:217-234.
- Ortiz, L. H., S. S. García, M. E. Castelán, y S. S. Córdova. 2012. Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Pub. Esp. Núm. 4:* 767-773.
- Pandey, A., C.R. Soccol, P. Nigam, and V.T. Soccol. 2000. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. *Bioresour. Technol.* 74: 69–80.
- PRONAC. 2007. “Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar”. (Consulta: 14 de julio 2014). Gobierno Federal. Disponible en línea: <http://www.75sagarpa.gob.mx/cgcs/discursos/2007/abril/Pronac.pdf>
- Quirk, R. G., L. Van Zwieten, S. Kimber, A. Downie., S. Morris, and J. Rust. 2012. Utilization of Biocarbón in Sugarcane and Sugar-Industry Management. *Sugar Tech.* 14(4):321–326.
- Rajkovich, S., A. Enders, K. Hanley, C. Hyland, R.A. Zimmerman, and J. Lehmann. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biocarbóns with varying properties to a temperate soil. *Biol. Fert. Soils.* 48:271–284.
- 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. *Biol Fert Soils.* 43:699–708.
- Saade, L. C., J.M. Venegas, K. Bravo, y A. Aguilera. 2006. Biomasa, un recurso energético para los aserraderos forestales. Coordinación de ingeniería de procesos industriales y ambientales del instituto de Ingeniería de la UNAM. La Jornada Michoacán, 1-20.
- Sarmiento, O., y M. Bibiana. 2011. Alternativas de compostaje de aserrín de pino caribe (*Pinus caribaea*) en la industria maderera Refocosta S.A., municipio de Villanueva, Casanare, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental.* 2 (2): 21-32.
- Seguros, de Texas. 2004. Peligros y Control del Aserrín. División de Compensación para Trabajadores (TDI/DWC). Austin, Texas. Pub No. HS98-134B (9-04).
- Sohi, S., E. L. Capel, E. Krull, and R. Bol. 2009. Biocarbón's roles in soil and climate change: A review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report 05/09, 64 pp.

- Sohi, S. P., E. Krull, E. L. Capel, and R. Bol. 2010. A Review of Biocarbón and Its Use and Function in Soil. *In* Donald L. Sparks editor: *Advances In Agronomy*, Vol. 105, Burlington: Elsevier Inc. Academic Press. 47-82.
- Soto, G., y M. Núñez. 2008. Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don), como material aglomerante. *Maderas. Cienc. tecn.* 10(2): 129-137.
- Starbuck, C. 1997. Producción y uso de composta de aserrín de avena y estiércol. *in* III Simposium Internacional y IV Reunión Nacional de Agricultura Sostenible. Universidad de Guadalajara, 16 a 19 de Noviembre, Guadalajara Jalisco. 96.
- Taghizadeh-Toosi A., T. J. Clough, R. R. Sherlock, and L.M. Condon. 2011. Wood Based Low-Temperature Biocarbón Captures NH_3 -N Generated From Ruminant Urine-N, Retaining Its Bioavailability. *Plant Soil.* 353:73-84.
- Toledo, E. C., J. A. A. Leyva, and H.A.J. Pohlen. 2008. Estimación de la producción de residuos agrícolas en agroecosistemas de caña de azúcar. *Cultivos Tropicales.* 29(3): 17-21.
- Toledo, T. E., H. A. J. Pohlen, V. M. R. Gehrke, and G. A. Leyva. 2005. Green sugarcane versus burned sugarcane results of six years in the Soconusco region of Chiapas, Mexico. *Sugar Cane International.* 23 (1) pp: 20- 27.
- Tsai, W.T., M.K. Lee, and Y.M. Chang. 2006. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. *J. Anal Appl Pyrol.* 76:230–237.
- Verheijen, F.G.A., S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde, and I. Diafas. 2010. Biocarbón Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24099 – EN, Italy .149p.
- Wannapeera, J., N. Worasuwanarak, and S. Pipatmanomai. 2008. Product yields and characteristics of rice husk, rice straw and corncob during fast pyrolysis in a drop-tube/fixed-bed reactor. *SJST.* 30(3): 393-404.
- Wardle, D.A., M.C. Nilsson, and O. Zackrisson. 2008. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. *Science.* 320: 629.
- Wiedenfeld, B. 2009. Effects of green harvesting vs burning on soil properties, growth and yield of sugarcane in south Texas. *J. Am. Soc. Sugar Cane Technol.* 29:102-109.
- Winsley, P. 2007. Biocarbón and bioenergy production for climate change mitigation. *New Zeal Sci. Re.* 64(1): 5-1.
- Yuan, J., R. Xu, and H. Zhang. 2011. The forms of alkalis in the biocarbón produced from crop residues at different temperatures. *Bioresour. Technol.* 102: 3488–3497.

ZAFRANET. 2008. “La Importación de azúcar se traducirá en bajos costos para el consumidor, SAGARPA”.(Consulta: 12 mayo 2014). Disponible en línea: <http://www.zafranet.com/2009/10/la-importacion-de-azucar-se-traducira-en-bajos-costos-para-el-consumidor-sagarpa/>

CAPÍTULO 3

BIOCARBON DE RESIDUOS AGRO-INDUSTRIALES USADOS COMO SUSTRATOS PARA PLANTULAS DE *Pinus greggii* Engelm. ex Parl.

G. Pérez-González¹, C. Hidalgo-Moreno¹, J.D. Etchevers-Barra¹, B.H.J. de Jong², S. Salgado-García¹, E. Valtierra-Pacheco¹, M.A. López-López¹

¹ Programa de Edafología, Colegio de postgraduados. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56230, Estado de México; 9931450019. ² El Colegio de la Frontera Sur, Campeche Av. Rancho Polígono 2A; Parque Industrial Lerma, Campeche 24500. Autor responsable: hidalgo@colpos.mx

RESUMEN

Los materiales que se emplean actualmente en la formulación de sustratos en viveros tienen una vida corta y son costosos. Una alternativa es el uso de sustratos elaborados a partir de los residuos agrícolas como el aserrín de pino y bagazo de caña azúcar pirolizados en forma de biocarbón. Estos materiales generan hoy en día contaminación al medio ambiente.

Para este trabajo se usó dos tipos de materiales, para la elaboración del biocarbón, bagazo de caña con partícula gruesa (BCA) y aserrín de pino a dos tamaños de partícula gruesa (> 4mm) y fina (< 4mm) (APG y APFA). El objetivo general de este trabajo fue determinar si el tamaño de partícula gruesa (> 4mm) y fina (< 4mm) y el tipo de material de biocarbón de aserrín de pino (APG y APFA) y bagazo de caña de azúcar (BCA), tienen efecto sobre las características de las variables de crecimiento en sustratos en plántulas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en vivero.

Las variables de crecimiento del pino fueron altura, diámetro, biomasa aérea (BA), la biomasa radical (BR), la biomasa total acumulada (BTA) (BA+BR), la relación parte aérea / radicular (A/R) y contenidos de elementos totales (N, P, K, Ca, Mg y Na) de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. El tipo de biomasa con que se elaboró el biocarbón (bagazo de caña y aserrín de pino), así como el tamaño de partícula del aserrín de pino (grueso y fino) tuvieron efectos significativos en

las características físico-químicas de los biocarbones elaborados por pirólisis a alta temperatura (600 °C).

El tamaño de partícula (gruesa, fina) usada para elaborar los biocarbones de aserrín de pino grueso y fino tuvo un efecto altamente significativo en la altura, sin embargo en ningún caso superó lo obtenido en el suelo forestal. El tipo de material usado en los tratamientos evaluados, suelo con biocarbones de bagazo de caña de azúcar y de aserrín de pino grueso (BCA+C y APGA+C) presentó efecto significativo en altura, diámetro y biomasa radical de *Pinus greggii Engelm.* ex Parl. bajo condiciones de vivero.

Palabras clave: Biocarbón, sustratos, suelo forestal, variables, nutrimentos.

INTRODUCCIÓN

La elección de un sustrato es fundamental para la producción de plantas en vivero. Se debe escoger un sustrato cuyas características físicas y químicas permitan lograr un crecimiento vigoroso y supervivencia de las plantas una vez fuera del vivero (Prieto, 1999). La elección del sustrato también debe basarse en la disponibilidad, durabilidad y costo de los materiales que se usan (García, 1999, Lieten *et al.*, 2004). En México el principal sustrato usado en viveros forestales es la mezcla turba-agrolita-vermiculita en la proporción 60:30:10 (Sánchez *et al.*, 2008). El *Pinus greggii* Engelm. ex Parl debe alcanzar una altura de 40 cm (después de 12 meses) para considerar que el sustrato es exitoso en su desarrollo sin embargo este estándar no garantiza que la planta tenga una persistencia exitosa en campo. El *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. es una especie endémica de México que crece naturalmente en dos regiones ampliamente separadas de la Sierra Madre Oriental. Las poblaciones del norte crecen en los Estados de Coahuila y Nuevo León a una altitud superior a 2200 m, con una precipitación anual promedio de 650 mm y una temperatura anual promedio alrededor de 14 °C. En el sur procede de cinco Estados (Hidalgo, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí y Veracruz), usualmente en altitudes inferiores a 1900 m, con una precipitación anual entre 700 y 2000 mm y una temperatura anual promedio de 17 °C. La región norte tiene suelos con un pH ligeramente alcalino, mientras que la región sur tiene suelos más ácidos (Donahue y López-Upton, 1996). Tiene un buen desempeño en programas de reforestación en México y otros países (Dvorak *et al.*, 2000). Las especies de pinus son preferidas en los programas de reforestación en México (PRONARE, 1998), por su adaptabilidad a bajas temperaturas y a condiciones de sequía en México (Vargas y Muñoz, 1988; López y Muñoz, 1991; Dvorak *et al.*, 2000). El desarrollo de la raíz es el otro aspecto importante en la supervivencia. Los sustratos usados hoy en día, no han logrado ser sostenibles, debido al

alto costo de algunos y a la poca durabilidad de otros, por lo que se han propuestos materiales de desecho agrícola y urbano (Dumroese *et al.*, 2011). El biocarbón (biochar) no ha formado parte de estos materiales alternativos, debido a que su conocimiento y aplicaciones son relativamente reciente. Sin embargo, este material representa una alternativa potencial como componente de sustratos (Peterson, 2013). El biocarbón es un producto carbonoso que se obtiene por pirolisis de biomasa (Lehmann, 2007; Verheijen *et al.*, 2010) a temperaturas entre 300 y 700 °C, en ambiente con oxígeno limitado ausente (Brown, 2009; Lehmann and Joseph, 2009). El uso del biocarbón como sustrato es deseable porque es ligero, poroso, retiene agua, es muy durable y puede reducir las aplicaciones de nutrientes (Altland y Locke, 2012) y también contribuir al proceso de captura de carbono (Dumroese *et al.*, 2011), aspecto que está siendo evaluado como parte de las estrategias de mitigación a los efectos del cambio climático.

El biocarbón de madera de pino (*Pinus* sp.) y caucho (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) se han propuesto como sustratos alternativos en viveros (Dumroese *et al.*, 2011, Nelson, 2012, Altland y Locke, 2012) aun cuando tienen pocos nutrientes (Gaskin *et al.*, 2008). El más usado es el de pino (*Pinus* sp.) cuya densidad del biocarbón es de (0.15 g cm⁻³) es parecida a la de la turba (Steiner and Harttung, 2014) y también se ha usado mezclado con *peat moss* (Dumroese *et al.*, 2011) y otros materiales como estiércol, suelo, vermiculita, perlita y arena (Kadota y Niimi, 2004). El biocarbón de madera de pino mezclado con turba puede reemplazar a la perlita (Northup and Gladon, 2013). Algunos resultados señalan que la adición de biocarbón a plantas de *Melanpodiumy scarletsage* no tuvo efecto sobre su crecimiento (Kadota y Niimi, 2004) y también se han observado reducciones en el crecimiento de nuez de macadamia (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche) al usar biocarbón sin aplicaciones de fertilizante (Deenik *et al.*, 2010). Sin embargo, otras investigaciones han reportado que al mezclar biocarbón con turba se

promueve el crecimiento de la raíz en maíz (Jones *et al.*, 2012). Las propiedades físicas y químicas de los biocarbones producidos por pirólisis están definidas por el tipo y tamaño de partícula de la biomasa usada, y por la temperatura de pirolización. El tiempo de pirolisis (lenta o rápida) también tiene un efecto en las características de los biocarbones, como su estructura, porosidad, pH, área superficial, lo que confiere un comportamiento de éstos en el suelo (Bruun, 2011). En México, durante el proceso de extracción del azúcar en la fábrica, se generan 250 kg de bagazo por tonelada de caña procesada (Salgado *et al.*, 2013) y 2 800 000 m³ de aserrín (Cruz, 2012) por lo que en este estudio se propone dar valor agregado a estos residuos agrícolas-industriales al reciclar esta biomasa para convertirla en biocarbón. El biocarbón podría sustituir parte de los materiales usados como sustratos en la producción de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en vivero. Por otra parte, la producción de biocarbón podría ser una fuente de trabajo en algunos sectores rurales del país. El objetivo general de esta investigación fue determinar si el tamaño de partícula gruesa (> 4mm) y fina (< 4mm) y el tipo de material de biocarbón de aserrín de pino y bagazo de caña de azúcar, tienen efecto sobre las características de las variables de crecimiento en sustratos en plántulas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en vivero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características físicas y químicas de los biocarbones

Pirolisis. Se usó pirolizador artesanal diseñado por la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO) para medios rurales altamente diseminados en el país. El pirolizador artesanal consistió en un tubo metálico, el cual se le adicionó 20 kg del material seco, se cerró en ambos lados y se colocó al fuego, el cual es alimentado por leña de diferente calidad, y alcanza una temperatura 600°C, el tubo se giró constantemente por un tiempo de 4 horas para homogeneizar la combustión del material. Durante este proceso se observó en la fase de evaporación de humedad y la fase de

quema del hidrogeno, generado en la combustión. Para elaborar el biocarbón de aserrín de pino (*Pinus sp*) se usaron dos tamaños de partícula: grueso (>4 mm) y fino (<4 mm). Para el biocarbón de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L), solo se utilizó un tamaño grueso (>4 mm).

Manejo de muestra. El biocarbón se pasó por diferentes tamices: malla 4 (4.76 mm), malla 6 (3.36 mm), malla 20 (0.84 mm) y la malla 40 (0.42 mm). Se seleccionó para este trabajo el más abundante cuyo tamaño está comprendido entre 3.36 y 0.84 mm.

Caracterización del biocarbón. La caracterización física y química del biocarbón se realizó por cuadruplicado según normas establecidas (IBI, 2014) y se determinó el pH en H₂O relación 1:10 por potenciometría después de 15 minutos de reposo y agitación (Gaskin *et al.*, 2008), conductividad eléctrica relación 1:20 por conductimetría en el mismo recipiente usado para medir pH; capacidad de intercambio catiónico (CIC) y bases intercambiable (Ca, K, Mg y Na) mediante extracción con acetato de amonio (CH₃COONH₄) 1 N pH 7 y usando un g de biocarbón con 50 ml de CH₃COONH₄; nitrógeno total por digestión ácida (4 ml de una mezcla H₂SO₄ + ácido salicílico-H₂O₂) y destilación; fósforo total y bases totales con una digestión ácida (6 ml HNO₃-HClO₄), la determinación de P se realizó por espectroscopía uv-vis y la de las bases con absorción atómica; carbono total (C_t) con analizador automático SHIMADZU Modelo TOC-VCSN; materia volátil, humedad y cenizas usando la metodología sugerida en la Norma ASTM-D1762 carbón vegetal-84 (1990).

Con los datos generados se realizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey con el paquete Statistical Analysis System, se corrieron cuatro repeticiones por cada tratamiento, para conocer si había diferencia estadística entre ellos en cuanto al tipo de material.

Las técnicas para caracterizar al suelo fueron las siguientes: 1) pH en H₂O relación 1:10 por potenciometría; 2) Conductividad eléctrica relación 1:20 por conductimetría; 3) Bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K) y 4) Capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediante extracción con acetato de amonio (CH₃COONH₄) 1 N pH 7; 5) nitrógeno total por digestión ácida y destilación; 6) fósforo extractable para el suelo y NH₄F-HCl 0.1N, la determinación de P se realizó por espectroscopía uv-vis.

Evaluación de los biocarbones como sustrato

Preparación del sustrato. Se preparó una mezcla biocarbón y suelo forestal con una relación 1:9 Cuadro 3.1. Como componente fundamental del sustrato se utilizó suelo forestal proveniente de la falda occidental de la Sierra Nevada, al oriente del municipio de Texcoco, a una profundidad de 40 cm. El suelo se secó a la sombra y se tamizó por malla 2 mm.

El desempeño de los biocarbones producidos como sustratos de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., se evaluaron en condiciones de vivero, en algunas variables de crecimiento. La evaluación para dichas variables se realizó de la siguiente manera: a) El tamaño de partícula gruesa y fina se evaluó en los biocarbones de aserrín de pino solamente y b) el efecto a obtener por el tipo de materiales evaluados como el biocarbón de bagazo de caña (BCA) y el biocarbón de aserrín de pino en el tamaño de partícula gruesa (APGA), producidos estos materiales a una alta temperatura (600 °C).

Cuadro 3.1. Materiales utilizados y tamaño de partícula para obtener el biocarbón en condiciones de pirolisis.

Tratamientos	Material del biocarbón	Temperatura °C	Tamaño partícula mm
(BCA+C)	Bagazo de caña	600	(> 4)
(APFA+C)	Aserrín de pino	600	(< 4)
(APGA+C)	Aserrín de pino	600	(> 4)
(C)	Suelo forestal	-	2

Tratamientos: BCA+C: Bagazo de caña alta temperatura +suelo forestal, APFA +C: Aserrín pino fino alta temperatura + suelo forestal, APGA+C: Aserrín pino grueso alta temperatura+ suelo forestal, C: suelo forestal.

Trasplante de plantas

El experimento establecido para obtener una respuesta a la aplicación de los materiales base biocarbón, se condujo en el invernadero del Programa Forestal del Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo en Texcoco, estado de México, utilizando conos de 250 cm³, para establecer la especie forestal de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. Cada charola conformada por 20 conos, añadiendo sustrato al cono hasta un 75% de capacidad, enseguida se sembraron de forma directa y manual de 5 a 10 semillas de la especie de estudio *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., a 0.5 cm de profundidad, donde una vez germinadas, se eliminaron dejando solo una planta por cono utilizado. El riego se hizo de forma diaria desde el inicio de la siembra hasta la germinación (0 a 27 DDS). Una vez que germinaron las semillas (después de los 27 DDS) y cuando la planta alcanzó en promedio 13 cm de altura, el riego se aplicó cada dos días, hasta los 152 DDS. Después de los 152 DDS, se aplicaron riegos cada tercer día hasta los 244 DDS, tiempo en que terminó el experimento. El diseño experimental empleado fue completo al azar con tres tratamientos y 10 repeticiones. El número total de unidades experimentales fueron 30 unidades. La siembra se realizó el 25 de abril del año 2012.

Variables de respuesta evaluadas en las plantas

La evaluación de las variables respuesta en las plantas, se hizo a los ocho meses de establecido el experimento (244 DDS). La altura de las plantas, se midió con una regla graduada de 30 cm, desde la base de la planta hasta la yema principal. El diámetro se midió al ras del suelo con un vernier digital Mitutoyo con precisión de 0.01 mm. Se cuantificó la biomasa aérea (BA), la biomasa radical (BR), la biomasa total acumulada (BTA) (biomasa aérea + biomasa radical). La relación parte aérea/radicular (A/R), se calculó como el cociente entre el peso de la biomasa aérea expresada en g y el peso de la biomasa radical expresada también en g (Thompson, 1985). La parte aérea se conformó por hojas (acículas) y tallo, la parte subterránea fue conformada por la raíz de la planta en estudio. Cada una de la parte aérea y radical, se lavaron con agua destilada utilizando una charola plástica, después se colocaron sobre una mesa eliminando los excesos de agua. Los sobres de papel etiquetados se llevaron a una estufa de secado a 70°C de temperatura, con circulación forzada de aire, hasta peso constante. Una vez seco el material se pesó en una balanza analítica (0.01 g) y se determinó el peso de la parte aérea y de la parte radical por separado.

Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, y Na se determinaron usando las técnicas tradicionales: nitrógeno total por el procedimiento semi-microkjeldahl; fosforo y niveles de Ca, Na, Mg y K totales por digestión ácida ($\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$), y cuantificación con espectroscopía uv-vis para P y absorción atómica para el resto de elementos.

Análisis estadístico

Para todas variables se realizó el ANOVA y la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, con el paquete Statistical Analysis System (SAS).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicas y químicas de los biocarbones

Carbono total (Ct). El contenido de Ct, en los tres biocarbones fue de 82, 90 y 94%. El porcentaje de Ct varía de 82 a 94% en el biocarbón elaborado (Cuadro 3.2), lo que indica una alta capacidad de carbonización del aserrín y del bagazo. El biocarbón BCA presentó el menor porcentaje de Ct en comparación con el biocarbón de aserrín. No obstante, el biocarbón de bagazo elaborado presentó mayor contenido de Ct, en comparación al 71% de Ct para biocarbón de bagazo elaborado a 500°C (Tsai *et al.*, 2006). El contenido de Ct del biocarbón de aserrín de *Pinus sp.*, fue mayor al 78% de Ct reportado para biocarbón de *Pinus sp.*, producido a temperaturas entre 400 °C y 500 °C (Gaskin *et al.*, 2008). Se ha reportado que temperatura menor a 350 °C genera biocarbón con mayor porcentaje de Ct (82 % Ct) (Rondón *et al.*, 2007), por lo que es probable que los mayores contenidos de Ct del biocarbón producido con el pirolizador artesanal se deban a un deficiente control de la temperatura de combustión.

La relación C/N. La relación C/N en los tres biocarbones (BCA, APFA y APGA), presentó valores diferentes, (Cuadro 3.2), el biocarbón de APGA tiene un valor de 470. El orden de mayor a menor relación C/N del biocarbón fue APGA>BCA>APFA. Sáenz (2010) reporta en maderas de *Pinus sp* y de chopo relaciones C/N de 431, 330 y 355 para diferentes temperaturas de pirolisis (lenta, rápida y de gasificación). Otros investigadores reportan una relación C/N de 199 para biocarbón de madera de pino (Dumroese *et al.*, 2011). En general, se ha reportado para biocarbones relaciones C/N de hasta 400 (Sullivan and Miller 2001; Chan and Xu, 2009; Lehmann and Joseph 2009). Estos resultados indican que la pirolización artesanal puede generar biocarbones con relaciones C/N dentro de los rangos reportados en literatura.

Nitrógeno total (Nt). El contenido de Nt de los tres biocarbones mostró diferencias significativas tanto por efecto del tipo del material (caña y aserrín) como por el tamaño de partícula del aserrín de pino (grueso y fino). El mayor porcentaje de Nt fue para el biocarbón APFA con (3.3%). Para biocarbón APGA y BCA se obtuvieron porcentajes de Nt muy bajos (0.2 y 0.6% respectivamente). Aunque el porcentaje de Nt para APFA está dentro del rango reportado para otros biocarbones de residuos forestales (Gaskin *et al.*, 2008; Brewer *et al.*, 2011), el porcentaje de Nt para el tamaño grueso (APGA) está por debajo de los valores reportados por Lehmann *et al.* (2003), Delucas *et al.* (2006) y Rondón *et al.* (2007) para biocarbones de madera (1.09% y 1.66% Nt). El porcentaje de Nt del biocarbón de bagazo de caña (BCA) fue menor que el reportado por Delucas *et al.*, 2006 y Tsai *et al.*, 2006 (1.77% Nt).

Contenido (Pt). El contenido de Pt del BCA fue estadísticamente mayor al contenido de los biocarbones de aserrín de pino (Cuadro 3.2). En este caso, el tamaño de partícula no tuvo ningún efecto sobre el contenido de Pt. Los valores de Pt de los biocarbones de aserrín de pino fueron menores a los rangos reportado para biocarbones obtenidos en diferentes tipos de madera, donde los valores son del orden de 0.06% y 1.36% (Lehmann *et al.*, 2003; DeLucas *et al.*, 2006 y Rondón *et al.*, 2007).

Contenido de bases totales. El contenido de Kt de BCA, fue estadísticamente mayor al contenido de los biocarbones de aserrín de pino (Cuadro 3.2). El biocarbón BCA, presentó un valor igual a 0.50 (Cuadro 3.2). Los valores de Kt, obtenidos en los biocarbones APFA y APGA (0.11 y 0.22%), no se encuentran dentro del rango reportado por los autores Dharmakeerthi *et al.* (2012) para biocarbón de madera de caucho con un valor de 9.1% Kt. El análisis estadístico mostró significancia para los porcentajes de Cat, Mgt y Nat, donde el biocarbón BCA, fue mejor que el resto de tratamientos con valores de 0.74 Ca, 0.74 Mg y 0.31 Na%, sin embargo estos fueron

menores a los reportados por Dharmakeerthi *et al.* (2012), para biocarbón de madera de caucho con valores de 14.9 para Cat y 4.3% Mgt.

Materia volátil. En el porcentaje de materia volátil del biocarbón APGA, mostró el valor más alto igual a 2.79%, mientras que para el biocarbón de APFA el valor fue de 2.36%, sin embargo estos valores son considerados bajos (IBI, 2014). La materia volátil es un parámetro que se estudia para conocer la calidad del biocarbón y su estabilidad, el contenido debe ser bajo (IBI, 2014), porque mayores de 35% se consideran altos y afectarían la estabilidad del material (Zimmerman, 2010), la disponibilidad de N y crecimiento de las plantas (Deenik *et al.*, 2010a), además de contener más carbono lábil. Deenik *et al.*, (2010a) consideran a la materia volátil alta cuando se tienen valores de 35% y con un 10% de materia volátil se consideran baja. Estos valores son cercanos a 1.7% para la materia volátil, valor reportado por Robertson *et al.* (2012) con la misma metodología (ASTM-D1762-84) en aserrín de madera de pino, pero menores a 7.2%, valor reportado por Brewer *et al.* (2011), para biocarbones de residuo de madera, producidos a una temperatura de 800 °C. Otros autores reportan valores más elevados para la materia volátil ya que estos porcentajes dependen en gran medida del material de origen del que se obtiene el biocarbón. Novak *et al.* (2009), obtuvieron un porcentaje de 74.4% de materia volátil para biocarbones obtenidos a una temperatura de 250 °C, de material de pastos, valor muy similar al reportado por Sensöz (2003), en *Pinus brutia* Ten, quién encontró un valor de 72%.

Contenido de Cenizas. Los porcentaje de cenizas, para los biocarbón BCA (15.10%), biocarbón APFA (2.0%) y el biocarbón APGA (1.70%), fueron mayores a los reportados por Sensöz, (2003), quien encontró un valor de 1.3% en biocarbón de *Pinus brutia* Ten. Mientras que un valor igual a 3.4%, fue reportado por Robertson *et al.* (2012) para biocarbón de *Pinuss* a una temperatura de 300°C, usando la misma metodología (ASTM-D1762-84). En tanto que Brewer

et al. (2011), reportaron un valor de 16.7%, para biocarbón de residuos de madera producidos a una temperatura de 800 °C. La ceniza en el biocarbón está compuesta principalmente por óxidos de aluminio, silicio, hierro etc. y materia no combustible (McLaughlin *et al.*, 2009).

Contenido de humedad. En el porcentaje de humedad, los biocarbones BCA y APFA, arrojaron valores de 0.16 % y 0.15 %, los que concuerdan con los reportados por Robertson *et al.* (2012), de 0.316 % para el biocarbón de *Pinus.*, inferiores a un 3%, que es el valor en porcentaje señalado por Sensöz (2003), en biocarbón de *Pinus brutia* Ten. De acuerdo con Brewer *et al.* (2011), los biocarbones de madera, contienen hasta un 4% de humedad.

Cuadro 3. 2. Caracterización de los biocarbones de estudio, obtenidos de residuos agro-industriales generados en el presente experimento.

Biocarbón	Ct	C/N	Nt	Pt	Kt	Cat	Mgt	Nat	Materia volátil	Cenizas	Humedad
	%										
BCA	82	136	0.6b	0.16a	0.50a	0.74a	0.74a	0.31a	2.55	15.10	0.16
APFA	90	27	3.3a	0.02b	0.11b	0.20b	0.20b	0.17ab	2.36	2.00	0.15
APGA	94	470	0.2c	0.02b	0.22b	0.05c	0.05c	0.01c	2.79	1.70	0.07
BCA	82	136	0.6b	0.16a	0.50a	0.74a	0.74a	0.31a	2.55	15.10	0.16

Biocarbones: Bagazo de caña alta temperatura (BCA), aserrín pino fino alta temperatura (APFA), aserrín pino grueso alta temperatura (APGA). Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey (P≤0.05).

pH. Todos los biocarbones presentaron valores de pH neutros a alcalinos (Cuadro 3.3). El pH del biocarbón BCA fue mayor (9.4) que el pH de los biocarbones de aserrín (7.2-8.0). Los valores de pH de los biocarbones fueron significativamente diferentes por el tipo de material (caña, aserrín pino) y tamaño de partícula del aserrín de pino (grueso, fino). Carrier *et al.* (2012) reporta pH de biocarbón de bagazo de caña determinado en agua de 6.5, mientras que Gaskin *et al.* (2008a) encontró un pH de 8.3 en biocarbón de madera de *pinus*. Valores cercanos a los reportados en los biocarbones de aserrín de *pinus* en este experimento.

CE. Lo mismo se observó para la CE donde el biocarbón BCA fue mayor (0.67 dS m^{-1}) y significativamente diferente a la CE de los biocarbones de aserrín. También se observó efecto del tipo de material y del tamaño de partícula del aserrín de pino sobre la CE de los biocarbones. La CE del biocarbón de aserrín de pino fino (APFA) fue mayor (0.35 dS m^{-1}) a la CE del biocarbón de aserrín de pino grueso (APGA) (0.19 dS m^{-1}). El pH alcalino (7.2-9.4) del biocarbón BCA y del aserrín de pino (tamaño grueso y fino) (APGA, APFA) es resultado de una alta temperatura de pirolisis ($600 \text{ }^\circ\text{C}$). Esto se explica parcialmente porque en los biocarbones producidos a elevadas temperaturas ($> 600 \text{ }^\circ\text{C}$) se tiene una mayor aromaticidad y un bajo contenido de grupos carboxilos (Guo y Bustin, 1998). Es por ello que los biocarbones que se producen a temperaturas de pirolisis menores ($< 400 \text{ }^\circ\text{C}$) presentan pH ácidos, como resultado de una combustión incompleta de los componentes orgánicos (Shoi *et al.*, 2010). Los valores para la CIC fueron muy bajos ($1\text{-}1.3 \text{ cmol}^+\text{kg}^{-1}$) en los tres biocarbones evaluados y presentaron diferencias significativas debidas al tipo de material y al tamaño de partícula del aserrín de pino (Tabla 3.3). Estos valores resultaron ser muy bajos respecto a los que se reportan para biocarbones de astilla de pino ($5.0 \text{ cmol}^+\text{kg}^{-1}$) producidos a alta temperatura ($400 \text{ a } 500 \text{ }^\circ\text{C}$) (Gaskin *et al.*, 2008a) quien empleó una extracción con solución Mehlich 1. Esto puede ser atribuido a la técnica usada para evaluar la CIC en la cual el tiempo de contacto biocarbón: acetato de amonio no fue suficiente para poder llevar a cabo el intercambio de las bases presentes en los biocarbones por el catión NH_4^+ . En el momento de la evaluación de esta característica no se tenía disponible la metodología propuesta por la Iniciativa Internacional de Biochar (IBI, 2014) para evaluar la CIC. Por lo que será necesario re-evaluar esta característica siguiendo los procedimientos ahora disponibles.

Los valores obtenidos para las bases intercambiables Ca, Mg, Na y K determinadas por extracción con AcONH_4 1n pH 7 fueron bajos en todos los biocarbones ($< 1 \text{ cmoles+kg}^{-1}$) con excepción de: K en biocarbón de aserrín de pino grueso (APGA) (4 cmoles+Kg^{-1}), y de Ca en biocarbón de bagazo de caña (2 cmoles+kg^{-1}) ($1.15 \text{ cmoles+kg}^{-1}$) (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Características físico-químicas de los biocarbones obtenidos de residuos agro-industriales generados en el presente experimento.

Biocarbón	pH	CE	CIC	K	Ca	Mg	Na
	(H_2O)(1:10)	(dSm^{-1})			$\text{NH}_4\text{OAc1N pH 7}$ (cmoles+kg^{-1})		
BCA	9.4a	0.67a	1.30a	2.1b	1.15a	0.35a	0.27a
APFA	8.0b	0.35b	1.32a	0.32c	0.55b	0.10b	0.35a
APGA	7.2c	0.19c	1.00b	4.0a	0.19c	0.10b	0.01b

Biocarbones: Bagazo de caña alta temperatura (BCA), aserrín pino fino alta temperatura (APFA), aserrín pino grueso alta temperatura (APGA). Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Características físicas y químicas del suelo

El suelo forestal utilizado en este trabajo se obtuvo de la parte boscosa alledaña al monte Tláloc ubicado en Texcoco, Edo. de México. De acuerdo con Pérez *et al.*, (2015) (en revisión) el suelo tamizado a malla de 2 mm presentó un pH moderadamente ácido igual a 6.5 y un bajo contenido de bases intercambiables: $0.83 \text{ cmol K}^+ \text{ kg}^{-1}$, $4.5 \text{ cmol Mg}^{2+} \text{ kg}^{-1}$, $0.5 \text{ cmol Na}^+ \text{ kg}^{-1}$ y $9.6 \text{ cmol Ca}^{2+} \text{ kg}^{-1}$, además de una CIC igual a $10.5 \text{ cmol kg}^{-1}$. Es un suelo con bajo contenido de Nt (0.4%) y P extraíble (7.5 ppm Bray 1) con valor medio (NOM-021-RECNAT- 2000).

Efecto del tamaño de partícula en las variables de crecimiento

La altura de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., la biomasa seca área y la biomasa total acumulada (BTA) presentaron diferencias significativas por efecto del tamaño de partícula en el biocarbón de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. (Cuadro 3.4). El resto de las variables de

crecimiento fueron iguales de acuerdo a Tukey. De acuerdo a la prueba de Tukey se observó una tendencia a un mayor crecimiento en el tratamiento a base de suelo forestal en comparación de las mezclas de suelo y biocarbón. Lo cual se explica por el bajo contenido de nutrientes del biocarbón con respecto al suelo forestal que se caracterizó por presentar un pH moderadamente ácido (6.5) y bases intercambiables K (0.83 cmol kg⁻¹), Mg (4.5 cmol kg⁻¹), Na (0.5 cmol kg⁻¹) y Ca (9.6 cmol kg⁻¹) y una CIC baja (10.5 cmol kg⁻¹) (NOM-021-RECNAT- 2000). El suelo presentó un contenido bajo de nitrógeno total de 0.4% y 7.5 ppm de fósforo extraíble, considerado como medio (NOM-021-RECNAT- 2000).

En la literatura mundial, los resultados son contradictorios con respecto al tamaño de partícula, Cornelissen *et al.* (2013) y Ceao *et al.* (2014), reportaron que no observaron efecto sobre la altura y biomasa, de *Zea mays* y *Triticum* spp. Por el contrario, Graber *et al.* (2010) al usar biocarbón de madera si observaron aumento de la biomasa aérea en pimiento (*Capsicum annuum*) y en la altura de tomates.

Cuadro 3.4. Variables de crecimiento del *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en tratamientos elaborados con diferente tamaño de partícula.

Variables de crecimiento	Tratamiento			Significancia
	APGA+C	APFA+C	C	
Altura (cm)	6.30 b	7.70 ab	9.60 a	0.0020 (**)
Diámetro (mm)	1.72 a	1.80 a	2.00 a	NS
Biomasa aérea (g)	0.20 b	0.23 b	0.85 a	0.03 (*)
Biomasa radical (g)	0.17 a	0.21 a	0.32 a	NS
Biomasa total acumulada (g)	0.37 b	0.45 b	1.17 a	0.0001 (**)
Relación parte aérea/radicular	1.51 a	1.08 a	2.04 a	NS

Tratamientos: APGA+C: Aserrín pino grueso alta temperatura + suelo forestal, APFA+C: Aserrín pino fino alta temperatura + suelo forestal, C: suelo forestal. *significativo, **altamente significativo y NS: no significativo. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey (P≤0.05); edad de 8 meses.

Contenido nutrimental en plantas de pino

Los contenidos de elementos totales en las plantas de pino fueron iguales estadísticamente en la biomasa seca aérea y biomasa seca radical, con excepción del Mg en esta última (Cuadro 3.5). Lo anterior, indica que los sustratos con biocarbón y suelo, aportaron los nutrientes para el desarrollo de la planta de pino. Por lo tanto se descarta el efecto del tamaño de partícula del biocarbón de aserrín de pino. El tiempo de evaluación de 8 meses se considera corto considerando que en estas evaluaciones se requiere de 24 meses de crecimiento; lo cual, explica las diferencias no significativas para las variables de crecimiento evaluadas. Aunque se han reportado concentraciones de Pt entre 0.1 y 1.2 % para biomasa aérea de coníferas (Domínguez, 1997), los niveles de P en la raíz no son relevantes debido a que es común en las coníferas que este elemento sea transportado a la parte aérea desde las primeras etapas de crecimiento (Nõmmik y Larsson, 1992). Las concentraciones de K obtenidas para biomasa aérea y biomasa radicular son mayores a los reportados por Dickens *et al.* (2003) en *Pinus Loblolly* (0.30 a 0.35 % de K) y Longleaf (0.10 a 0.12 % K). También los porcentajes de Ca y Mg obtenidos en la biomasa seca aérea y biomasa radicular de los sustratos de biocarbón de pino, fueron mayores a los 0.05 a 0.07 % de K, reportados en *Pinus Slash* por Dickens *et al.* (2003).

Efecto en los sustratos o tipo de material a base biocarbón

En el Cuadro 3.6, las variables altura de planta, diámetro de tallo, biomasa aérea, biomasa radical, biomasa total acumulada y la relación parte aérea/raíz, el análisis estadístico realizado arrojó significancia, donde el tratamiento C, que se refiere al Control (Suelo forestal), resultó mejor que el resto de tratamientos, arrojando valores iguales a 9.60 cm, 2.00 mm, 0.85 g, 0.32 g, 1.17 g y 2.04 g, en plantas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl.

Cuadro 3.5. Valores medios para los elementos nutrimentales en biomasa aérea y biomasa radical de plantas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., en los biocarbones de estudio obtenidos de residuos agro-industriales.

Variables de respuesta	Tratamientos			Significancia
	APGA+ C	APFA+C	C	
	Biomasa aérea (BA)			
	%			
N	1.87 a	1.88 a	1.50 a	NS
P	0.12 a	0.08 a	0.17 a	NS
K	1.61 a	1.86 a	1.54 a	NS
Ca	0.58 a	0.66 a	0.57 a	NS
Mg	0.35 a	0.43a	0.38 a	NS
Na	0.02 a	0.02 a	0.02 a	NS
	Biomasa radicular (BR)			
	%			
N	1.31 a	1.16 a	1.33 a	NS
P	0.12 a	0.07 a	0.11 a	NS
K	0.76 a	0.78 a	1.09 a	NS
Ca	0.38 a	0.43 a	0.57 a	NS
Mg	0.22 b	0.19 b	0.37 a	0.01
Na	0.40 a	0.11 a	0.18 a	NS

Tratamientos: APGA+C: Aserrín pino grueso alta temperatura + suelo forestal, APFA+C: Aserrín pino fino alta temperatura + suelo forestal, C: suelo forestal. *significativo, ** altamente significativo y NS: no significativo. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); edad de 8 meses.

Los resultados obtenidos en este experimento, determinan que los tratamientos base biocarbones (BCA+C y APGA+C), no produjeron efecto a corto plazo en las variables de respuesta, comparados con el Control (Suelo forestal). De acuerdo a Thompson (1985), la relación parte Aérea/Raíz, no debe ser mayor a 2.5, señalando que relaciones mayores a ese valor se asocia a la probabilidad de muerte de las plantas en campo, por la cantidad baja en reservas de carbohidratos en la raíz. Los biocarbones evaluados presentaron valores correspondientes a la relación parte aérea/radicular menores, esto indica que las plantas de pino en estudio podrían sobrevivir a las condiciones de campo. Esto es algo que debe ser considerado en el establecimiento de pinos en áreas con escasa disponibilidad de agua o sequía, así como en programas de reforestación. La adición de biocarbón estimula la biomasa radical y el desarrollo de la zona del meristemo (Makoto *et al.*, 2010). Las razones de este estímulo no están

debidamente identificadas, pero se sabe que el biocarbón está relacionado con este estímulo (Lehmann *et al.*, 2011). Adicionalmente la disponibilidad de nutrientes del suelo favorece también el desarrollo de la raíz, la capacidad de retención de agua y la aireación del suelo (Lehmann *et al.*, 2011). Sin embargo valores bajos para la relación parte Aérea/Radicular favorece una mayor capacidad de absorción de nutrimentos del suelo (Wilson, 1998, Lehmann *et al.*, 2011).

Cuadro 3. 6. Valores medios para los sustratos y las variables de crecimiento con significancia en biocarbones de residuos agro-industriales.

Variables de crecimiento	Tratamientos			Significancia
	BCA+C	APGA+C	C	
Altura (cm)	8.90 a	6.30 b	9.60 a	0.002 (**)
Diámetro (mm)	1.90 a	1.72 a	2.05 a	NS
Biomasa aérea (g)	0.24 b	0.20 b	0.85 a	0.032 (*)
Biomasa radical(g)	0.14 b	0.17 ab	0.32 a	0.023 (*)
Biomasa total acumulada(g)	0.38 b	0.37 b	1.17 a	0.007 (**)
Relación parte aérea/radicular	1.88 a	1.51 a	2.04 a	NS

Tratamientos: BCA+C: Bagazo de caña alta temperatura+ suelo forestal, APGA+C: Aserrín pino grueso alta temperatura+ suelo forestal, C: suelo forestal.*significativo, **altamente significativo y NS: no significativo. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); edad de 8 meses.

Contenido nutrimental en planta

Los elementos nutrimentales totales encontrados en la Biomasa aérea y en la Biomasa radical de plantas de Pino (*Pinus greggii* Engelm. ex Parl.), no mostraron significancia estadística en el análisis realizado a la Biomasa aérea a excepción de K, quién mostro significancia, donde el tratamiento base biocarbón BCA+C, fue superior al resto de tratamientos con un valor igual a 2.20%. Sin embargo los sustrato base biocarbón que arrojaron los valores más altos para cada uno de los nutrimentos que no arrojaron significancia fue APGA+C, para N, con un valor igual a 1.87%, el Control (C), para P, con 0.17%, BCA+C, para Mg, Ca y Na, con valores de 0.81%,

0.05% y 0.46%. Para la Biomasa radical ninguno de los elementos nutrimentales arrojo significancia estadística, Cuadro 3.7.

Los valores del contenido para N y K, en la biomasa aérea y la biomasa radical, están dentro de los valores reportados por Alcantar *et al.* (2007), reportando un valor para N, de 0.8% y de 5.0% para K. Pacheco-Escalona *et al.* (2007), reportan valores en el contenidos de N y K en biomasa aérea joven de plantas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., iguales a 0.4% para ambos nutrimentos. Binkley (1993), por su parte reporta valores de 0.9% a 4.0%, en biomasa aérea para N y K.

Cuadro 3. 7. Elementos totales encontrados en la biomasa aérea y la biomasa radical de plantas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en biocarbones de residuos agro-industriales.

Variables de respuesta %	Tratamientos			Significancia
	BCA+C	APGA+C	C	
Biomasa aérea				
N	1.65 a	1.87 a	1.51 a	NS
P	0.12 a	0.12 a	0.17 a	NS
K	2.20 a	1.61 ab	1.54 b	0.02
Ca	0.81 a	0.58 a	0.57 a	NS
Mg	0.46 a	0.35 a	0.38 a	NS
Na	0.05 a	0.02 a	0.02 a	NS
Biomasa radical				
N	1.29 a	1.31 a	1.33 a	NS
P	0.19 a	0.12 a	0.11 a	NS
K	1.07 a	0.76 a	1.09 a	NS
Ca	0.82 a	0.38 a	0.57 a	NS
Mg	0.32 a	0.22 a	0.37 a	NS
Na	0.19 a	0.14a	0.18 a	NS

Tratamientos: BCA+C: Bagazo de caña alta temperatura+ suelo forestal, APGA+C: Aserrín pino grueso alta temperatura+ suelo forestal, C: suelo forestal..NS: No significativo. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); edad de 8 meses.

CONCLUSIÓN

El tipo de biomasa sea bagazo de caña de azúcar o aserrín de pino, y el tamaño de partícula del aserrín de pino grueso o fino, tuvieron efectos significativos en la definición de las características físicas y químicas del biocarbón elaborado por pirolisis a alta temperatura (600 °C).

El efecto del tamaño de partícula (gruesa, fina) usada para elaborar los biocarbones aserrín de pino se observó en el mayor crecimiento del *Pinus greggii* Engelm. ex Parl, en biocarbón de APFA+C. La altura, diámetro, biomasa aérea, biomasa radical, biomasa total acumulada de la se observó ligeramente mayor que en el APGA+C, aún cuando no fueron significativamente diferentes. Las variables de crecimiento en estos dos tratamiento no superaron los valores obtenidos en el suelo forestal.

El tipo de material usado en los tratamientos BCA+C y APGA+C presentaron efecto significativo sobre altura, biomasa radical de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., sin embargo estadísticamente no superaron al control.

No se observó efecto significativo en los contenidos de elementos totales en la planta de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl, por efecto del tamaño de partícula ni por el tipo de material utilizado para elaborar el biocarbón de los sustratos.

Las relaciones parte área/ parte radical obtenida en los sustratos de biocarbón con suelo forestal indican un desarrollo radical adecuado que debe ser evaluado con mayor precisión ya que esta es una característica que podría dar a estos sustratos un potencial para ser considerados para su uso en plantaciones de reforestación.

LITERATURA CITADA

- Alcántar, G.G., L.I. Trejo-Téllez, P. Fernández, M.N. Rodríguez-Mendoza. 2007. Elementos Esenciales. In: Nutrición de Cultivos. Alcántar G.G., Trejo-Téllez L. (eds). México, D.F.: Editorial Mundi-Prensa. 7-48.
- Altland, J.E. and J.C. Locke. 2012. Biochar affects macronutrient leaching from a soilless substrate. *HortScience*. 47:1136-1140.
- ASTM, 1990. D1762–84, Standard Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM International, Philadelphia.
- Binkley, D. 1993. Nutrición forestal. Prácticas de manejo. Limusa. México. 350p.
- Brewer, C. E., H. Yan-yan, K. Schmidt-Rohr, T. E. Loynachan, D. A. Laird and R. C. Brown. 2011. Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. *Journal of Environmental Quality*. doi:10.2134/jeq2011.0118.
- Brown, R. 2009. Biocarbón production technology. In: Biocarbón for environmental management: Sci. Technol., Eds. Lehmann, J., Joseph, S. London: Earthscan Publications Ltd.
- Bruun, W.E., Ambus P., Egsgaard H., H. Hauggaard-Nielsen. 2012. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biology & Biochemistry* 46:73-79.
- Carriera, M., A. G. Hardieb, Ü. Urasa, J. Görgensa, J. (H.) Knoetzea. 2012. Production of char from vacuum pyrolysis of South-African sugar cane bagasse and its characterization as activated carbon and biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 96: 24–32.
- Chan, K., Z. Xu. 2009. Biochar. Nutrient Properties and Their Enhancement. In: Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Eds. J. Lehmann and S. Joseph. Earthscan, London; Sterling, VA: 53-66.
- Cruz, C. C. 2012. Residuos generados del aprovechamiento maderable en el estado de Durango. Tesis Ingeniero forestal industrial. Chapingo, Texcoco, Estado de México.
- Deenik, J. L., T. McClellan, G. Uehara, M.J. Antal, and S. Campbell. 2010. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:1259–1270.
- DeLuca, T.H., M.D. MacKenzie, M.J. Gundale and, W.E. Holben. 2006. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in Ponderosa pine forests. *Soil Science Society of America Journal*. 70:448–453.
- Dharmakeerthi, R. S., J. A. S. Chandrasiri and V. U. Edirimanne. 2012. Effect of rubber Wood biochar on nutrition and growth of nursery plants of *Hevea brasiliensis* established in an

Ultisol. SpringerPlus 1:84. Consultada el 24 de abril 2015
<http://www.springerplus.com/content/1/1/84>.

Dickens, E. D., D. Moorhead and B. Mcelvany. 2003. Pine plantation fertilization. *Better Crops* 87(1): 12 –15.

Domínguez, V.A. 1997. Tratado de fertilización. Mundi-prensa. España. 613p.

Donahue, J. K. y J. López-Upton. 1996. Geographic variation in leaf, cone and seed morphology of *Pinus greggii* Engelm. in native forest. *For. Ecol. Manag.* 82: 145- 157.

Dumroese, R.K., J. Heiskanen, K. Englund, and A. Tervahauta. 2011. Pelleted biochar: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomass Bioenerg.* 35:2018-2027.

Dvorak, W. S., J. E. Kietzka, J. K. Donahue, G. R. Hodge y T. K. Stanger. 2000. *Pinus greggii*. In: Conservation & Testing of Tropical & Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative. Central America & Mexico Coniferous Resources Cooperative, North Carolina State University, Raleigh, NC. pp. 52-73.

García, C. O. 1999. Material orgánicos como sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathyllum Wallisii* cultivados en macetas. Tesis de maestría. Colegio postgraduados, montecillos, México. 115 p.

Gaskin, J.W., Steiner C., Harris K., Das K.C. y B. Bibens. 2008a. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE* 51:2061–2069.

Guo, Y., R.M. Bustin. 1998. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: implications for studies of inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology* 37, 29e53.

International Biochar Initiative (IBI). 2014. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. http://www.biochar-international.org/sites/default/files/IBI_Biochar_Standards_V2%200_final_2014.pdf. Consultada 26 de abril del 2015.

Jones, D.L., J. Rousk, G. E. Jones, T.H. DeLuca and D.V. Murphy. 2012. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology & Biochemistry*, 45, 113–124.

Kadota, M., and Y. Niimi. 2004. Effects of charcoal with pyroligneous acid and barnyard manure on bedding plants. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 101:327–332.

Lehmann J., M. C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W. C. Hockaday and D. Crowley. 2011. “Biochar effects on soil biota- a review”. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1812-1836.

- Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black, *Frontiers in Ecology and the Environment* 5:381–387.
- Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. biochar para la gestión ambiental: una introducción. En: Lehmann, J., Joseph, S. (eds.), *Biochar para la Gestión Ambiental: Ciencia y Tecnología*, Earthscan, Londres. , pp 1-12.
- Lehmann, J., D.C. Kern, B. Glaser and W. I. Woods. 2003. Biochar and carbon sequestration. In: *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 523.
- Lieten, F., J. Longuetterre, G. Baruzzi, J. Lopezmedina, J.C. Navatel, E. Krueger, V. Matala and G. Paroussi. 2004. Recent situation of strawberry substrate culture in Europe. *Acta Horti* . 649: 193-196.
- López U., J. y A. Muñoz O. 1991. Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm. I. Evaluación en plántula. *Agrociencia, Serie Fitociencia* 2(2): 111-123.
- Makoto, K., Y. Tamai, Y.S. Kim and T. Koike. 2010. “Buried charcoal layer and ectomycorrhizae cooperatively promote the growth of *Larix gmelinii* seedlings”. *Plant and Soil* 327: 143-152.
- McLaughlin, H., P.S. Anderson, F.E. Shields, and T.B. Reed. 2009. All biochars are not created equal and how to tell them apart. North American Biochar Conference, Boulder,CO, <http://www.biocharinternational.org/node/1029>.
- Nelson, P.V. 2012. *Greenhouse operation and management*. 7th ed. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). 2002. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaria del medio ambiente y Recursos Naturales En línea:<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf>. Consultado el 20 de mayo 2007.
- Nõmmik, H. and K. Larsson. 1992. Effects of nitrogen source and placement on fertilizer 15N enrichment in *Pinus sylvestris* foliage. *Scandinavian Journal of Forest Research* 7: 155-163.
- Northup J.L. and R. J. Gladon. 2013. Plant Growth Shows Biochar Can Replace Perlite 48- 70. IN: *Biochar as a replacement for perlite in greenhouse soilless substrates*. Iowa State Univ., Ames, M.S. Thesis 13399.
- Novak, J. M., W. J. Busscher , D. 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 Science* . 174(2), 105-112.

- Pacheco-Escalona, F.C., A. Gómez-Guerrero, A. Aldrete, A.M. M. Fierros-González y V.M. Cetina-Alcalá. 2007. Absorción de nitrógeno Y crecimiento de *Pinus Greggii* Engelm. Seis Años Después De Una Poda Química De Raíz. *Agrociencia* 41: 675-685.
- Peterson, E. 2013. Black gold. *Digger* 57:13-16.
- Prieto, R. J.A., G. C. Vera y E. B. Merlin. 1999. Factores que influyen en la calidad de brinzales y criterios para su evaluación en vivero. Folleto Técnico N° 12. Campo experimental Valle del Guadiana. INIFAP. Durango, México. 23 p.
- PRONARE (Programa Nacional de Reforestación). 1998. Inventario Nacional de Planta. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). México, D. F. 21 p.
- Robertson, S.J., P.M. Rutherford P.M., J.C. Lopez-Gutierrez J.C., and B. H. Massicotte. 2012. Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of sub-boreal forest soils. *Canadian Journal. Soil Science.* 92: 329-340.
- Rondon, M., J. Lehmann, J. Ramírez and M. Hurtado. 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L) increases with biochar additions. *Soil Biology and Fertility of Soils* .43: 688–708.
- Sáenz M., D. Alberto. 2010. “Caracterización fisicoquímica de biochar en función de su origen y proceso pirogénico”. Máster oficial en Estudios Ambientales, especialidades: cambio climático y global.
- Sánchez-Córdova, T., A. Aldrete, V. M. Cetina-Alcalá y López-Upton J. López-Upton. 2008. Caracterización de medios de crecimiento compuestos por corteza de pino y aserrín Growth media characterization based on pine bark and sawdust. *Madera y Bosques* 14(2), 41-49.
- Sensöz, S. 2003. Slow pyrolysis of Wood barks from *Pinus brutia* Ten. And product compositions. *Bioresource Technology.* 89:307-311.
- Sohi, S., E. Lopez-Capel, E. Krull and E. Bol. 20010. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. In: CSIRO Land and Water Science Report.
- Steiner, C. and T. Harttung. 2014. Biochar as a growing media additive and peat substitute, *Solid Earth*, 5, 995–999.
- Sullivan, D.M. and R.O. Miller. 2001. Compost quality attributes, measurements and variability. In: Eds. P.J. Stofella and B.A. Kahn. *Compost utilization in horticultural cropping systems.* CRC Press: Boca Raton, FL: 95-120.
- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphological evaluation- what you can tell by looking? In: *Proceedings: evaluation seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of mayor test.*Duryea, M. L. (ed.). Oregon State University. Corvallis, Oregon.U.S.A. pp: 59-71.

- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphological evaluation- what you can tell by looking? In: Proceedings: evaluation seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of mayor test. Duryea, M. L. (ed.). Oregon State University. Corvallis, Oregon. U.S.A. pp: 59-71.
- Toledo, E., Cabrera, J.A., Leyva, A., H.A.J. Pohlen. 2008. Estimación de la producción de residuos agrícolas en agroecosistemas de caña de azúcar. *Cultivos Tropicales* 29(3): 17-21.
- Tsai, W.T., Lee M.K. and, Y.M. Chang. 2006. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. *Journal Anal Appl Pyrol.* 76:230–237.
- Vargas H., J. J. y A. Muñoz O. 1988. Resistencia a sequía: II. Crecimiento y supervivencia en plántulas de cuatro especies de Pinus. *Agrociencia* 72: 197-208.
- Verheijen, F.G.A., S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde, I. Diafas. 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. 149p.
- Wilson, J.B. 1998. "A review of the evidence on the control of shoot: root ratio in relation to models". *Annals of Botany* 61:433-449.
- Zimmerman, A.R. 2010. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). *Environ Sci Technol* 44:1295-301.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE BIOCARBÓN DE CAÑA DE AZÚCAR COMO SUSTRATO PARA EL DESARROLLO DE *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. EN VIVERO FORESTAL

G. Pérez-González¹, C. Hidalgo-Moreno¹, J.D. Etchevers-Barra¹, B.H.J. de Jong², S. Salgado-García¹, E. Valtierra-Pacheco¹, M.A. López -López¹

¹ Programa de Edafología, Colegio de postgraduados. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56230, Estado de México; 9931450019. ² El Colegio de la Frontera Sur, Campeche Av. Rancho Polígono 2A; Parque Industrial Lerma, Campeche 24500 (Datos de autor responsable: buzón electrónico; dirección postal; teléfono) Autor responsable: hidalgo@colpos.mx

RESUMEN

Los materiales usados en la producción de viveros forestales son costosos y de vida corta, por lo cual es necesario evaluar materiales alternativos. El biocarbón (biochar) de bagazo de caña de azúcar tiene características físicas y químicas que aporta al suelo beneficios, es liviano; el grado de porosidad es excelente; su capacidad de retención de agua es buena, y además es un producto con una vida útil de más de 100 años. Puede ser usado como sustratos de plantas en vivero. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta del biocarbón a base de bagazo de caña (BCA) como sustrato para la producción de plantas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl, bajo condiciones de vivero. Se usó del biocarbón a base de bagazo de caña, al cual se le determino características físicas y químicas (la materia volátil, cenizas, humedad, pH, CE, CIC, N, P, K, Ca, Mg y Na).

Se evaluó el biocarbón de bagazo de caña de azúcar combinado con suelo forestal (BCA+C), en una relación 1:9 y con un sustrato forestal (M) compuesto por 12.5% de *peat moss*, 12.5 % de agrolita, 25 % de vermiculita, 50 % de corteza de pino.

Las variables de crecimiento evaluadas fueron altura de planta, diámetro de tallo, biomasa total aérea (BA), biomasa total radical (BR), relación biomasa aérea /radicular (BA/BR), además la

concentración de nutrientes acumulados (N, P, Ca, K, Na y Mg) en la parte aérea y la parte radical. Los resultados obtenidos indican que la fertilización promovió una mayor altura, biomasa aérea y radical en el tratamiento combinado biocarbón con suelo (BCA+C), semejante a las obtenidas en los tratamientos con sustrato forestal, solo o combinado con biocarbón (M y BCA+M). Estos últimos tratamientos fueron los que presentaron los mayores valores para las variables de crecimiento evaluadas M y BCA+M, por lo que se concluye que se puede sustituir el sustrato comúnmente usado en los viveros forestales por un material alternativo constituido por biocarbón de bagazo de caña de azúcar (BCA) en combinación con suelo o con porcentajes variables del sustrato forestal evaluado.

Palabras claves: biocarbón, variables de crecimiento, bagazo de caña, suelo forestal, concentración de nutriente.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha buscado sustituir algunos componentes de los sustratos para plántulas de vivero forestal, por otros productos de bajo costo y sobretodo que sean renovables y materiales locales. Se han propuesto el uso de residuos de biomasa vegetal y animal provenientes de diversas actividades agropecuarias, con potencial de ser transformados en biocarbón (biochar) mediante pirólisis (Lehmann, 2007; Verheijen *et al.*, 2010). El biocarbón, ha sido propuesto para ser empleado principalmente como enmienda para suelos agrícolas (Lehmann y Joseph, 2009) debido a ciertas condiciones que favorecen la retención nutrimentos (Clough y Condon, 2010), el mejoramiento de la estructura del suelo (Liu *et al.*, 2012), estimula las poblaciones microbianas, entre otros beneficios. Los biocarbones pueden ser ácidos o alcalinos. Aquellos con pH alcalino pueden ser usados como materiales de encalado en suelos ácidos (Novak *et al.*, 2009). Se ha reportado que el biocarbón de caña de azúcar posee una alta capacidad de retención de nutrientes, elevada porosidad, capacidad de retención de agua y alta CIC (122 cmol kg^{-1}), similar a la de las arcillas, como vermiculita y montmorillonita (Carrier *et al.*, 2012). Este biocarbón, además tiene la capacidad de aumentar la eficiencia del uso de fertilizante (Quirk *et al.*, 2012). Biocarbones de aserrín y de bagazo de caña poseen características físicas importantes, como baja densidad aparente (0.15 g.cm^3), 81% de espacio poroso total y 67% de retención de humedad (Pérez *et al.*, 2015, en revisión). Estos valores están dentro de los rangos sugeridos por De Boodt *et al.* (1974) como adecuados para ser usados como sustrato. En un trabajo preliminar, Pérez *et al.*, (2015, en revisión) evaluaron biocarbones de aserrín de pino y de bagazo de caña de azúcar. En ese trabajo se reportaron diferencias significativas en las variables de crecimiento (altura, biomasa aérea y biomasa total acumulada) de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. asociadas al uso de biocarbón. Sin embargo, estos biocarbones no afectaron la concentración de nutrientes en

la biomasa aérea y radical de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. El uso de biocarbones como sustratos en viveros o invernaderos es algo reciente (Dumroese *et al.*, 2011, Nelson, 2012, Altland y Locke, 2012) y no ha sido probado en México. Existen pocos estudios sobre este tema, en México este uso solo ha sido reportado por Escalante *et al.*, (2014). Por otra parte, es difícil observar diferencias significativas en variables de crecimiento en plantas en vivero, cuando el tiempo de estudio es corto (Kadota y Niimi 2004). El biocarbón apunta a sustituir sustratos comerciales como el *peat moss*, la agrolita, la vermiculita, materiales que son de alto costo (Northup *et al.*, 2013; Altland y Locke 2012; Fain *et al.*, 2008; Wright and Browder, 2005). El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño del biocarbón de bagazo de caña como sustrato para la producción de plantas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., bajo condiciones de vivero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en el vivero forestal del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, en Texcoco, estado de México.

Diseño experimental y tratamientos

Se usó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4x2 (cuatro sustratos y dos sistemas de fertilización: con y sin fertilizante), que genera ocho tratamientos de estudio con 10 repeticiones para cada uno, para un total de 80 unidades experimentales.

Biochar. Se utilizó el biocarbón de bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) obtenido en un pirolizador artesanal a alta temperatura (600 °C) y reportado por Pérez *et al.* (2015) (en revisión). Las características del biocarbón de bagazo de caña (BCA) son las reportadas por Pérez *et al.* (2015) (en revisión): tamaño de partícula entre 3.36 y 0.84 mm,

carbono total 82% (C_t), nitrógeno total 0.6% (N_t), relación carbono: nitrógeno (C/N) 136, fósforo total 0.16% (P_t), potasio total 0.50% (K_t), calcio total 0.74% (Ca_t), magnesio total 0.74% (Mg_t), sodio total 0.31% (Na_t), 2.55% de materia volátil, 15.10% de cenizas y un 0.16% humedad. Fue considerado un biocarbón alcalino por su pH de 9.4 (relación 1:10, biocarbón: H₂O), su conductividad eléctrica fue de 0.67 dSm⁻¹. Presentó una baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) igual a 1.30 cmol kg⁻¹ y las bases de intercambio presentaron valores de 2.1 cmol K⁺ kg⁻¹, 1.15 cmol Ca²⁺ kg⁻¹, 0.35 cmol Mg²⁺ kg⁻¹ y 0.27 cmol Na⁺ kg⁻¹. El suelo forestal utilizado en este trabajo, se obtuvo de la parte boscosa aledaña al monte Tlálloc, ubicado en Texcoco, estado de México. De acuerdo con Pérez *et al.*, (2015) (en revisión), el suelo tamizado en malla de 2 mm presentó un pH de 6.5, clasificado como moderadamente ácido y un alto contenido de bases intercambiables: 0.83 cmol K⁺ kg⁻¹, 4.5 cmol Mg²⁺ kg⁻¹, 0.5 cmol Na⁺ kg⁻¹ y 9.6 cmol Ca²⁺ kg⁻¹, además de una CIC igual a 10.5 cmol kg⁻¹. Este suelo arrojó un bajo contenido de N_t (0.4%) y un contenido de P extraíble de 7.5 ppm, por la metodología Bray 1.

Los cuatro tratamientos evaluados fueron: (1) biocarbón de bagazo de caña con suelo forestal en una relación 9:1 (BCA+C), (2) sustrato forestal (mezcla de 12.5 % peat moss, 12.5 % agrolita, 25 % vermiculita y 50 % corteza de pino (M)), (3) biocarbón de bagazo de caña con sustrato forestal en una relación 9:1 (BCA+M), y (4) Suelo forestal (C).

Manejo agronómico del vivero

Las prácticas de manejo usadas fueron las mismas que se emplean en los viveros del Colegio de Postgraduados. Durante la etapa de germinación se aplicó un riego adicional con Captán® (fungicida), en dosis de un gramo por litro de agua, para evitar el desarrollo de hongos fitopatógenos.

El tratamiento de fertilización consistió en la aplicación de dos dosis de fertilizante, para la primera se utilizó Fertilizer soluble® (20-20-20) compuesto por nitrógeno (9.8 % urea, 4.8 % nitrógeno amoniacal y 5.4 % de nitrógeno nítrico), fósforo (20 % P₂O₅) y potasio (20 % K₂O) a razón de cinco gramos de fertilizante por litro de agua, que se aplicó durante la etapa de crecimiento (27-152 DDS). La segunda dosis de fertilización se realizó del día 152 al 244 DDS con Technigro soluble® (4-25-35) compuesto por nitrógeno (1.1% de nitrógeno amoniacal y 2.9% de nitrógeno nítrico), fósforo (25% P₂O₅) y potasio (35% K₂O) a razón de cinco gramos del fertilizante por litro de agua.

Las plantas del tratamiento sin fertilizante, únicamente se regaron con agua destilada durante todo el ciclo.

Para el establecimiento de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., éste se sembró de forma directa. De cinco a 10 semillas se colocaron a medio centímetro de profundidad, y una vez germinadas sólo se dejó una planta. El riego se hizo diariamente, desde el inicio de la siembra hasta la germinación (día 27 después de la siembra) (DDS). Una vez que germinaron las semillas y la planta alcanzó en promedio 13 cm de altura, el riego se aplicó cada dos días hasta los 152 DDS, y a partir de ese momento los riegos se aplicaron cada tercer día hasta el término del experimento (244 DDS).

Variables de respuesta

Se realizó a los ocho meses de establecido el experimento (244 DDS).

La altura de planta, se midió con regla graduada de 30 cm, desde la base superior del sustrato hasta la yema principal de la planta.

El diámetro o grosor de tallo, se midió a ras del suelo con vernier digital marca Mitutoyo con precisión de 0.01 mm.

Se cuantificó tanto la biomasa aérea (BA), la biomasa radical (BR), y la biomasa total acumulada que se refiere a la suma de las biomásas aérea y radical (BTA).

La relación parte aérea-radicular (A/R), se calculó como el cociente obtenido entre el peso de la biomasa aérea expresada en gramos y el peso de la biomasa radical expresada también en gramos (Thompson, 1985). La parte aérea se conformó por hojas (acículas) y tallo, la parte subterránea fue conformada por la raíz. Cada parte fue lavada con agua destilada utilizando una charola plástica, y después se colocaron sobre una mesa para eliminar el exceso de agua. El material vegetal se colocó en sobres de papel etiquetados que fueron llevados a una estufa de secado (aprox. 70 °C), con circulación forzada de aire, hasta obtener peso constante. Una vez seco el material se pesó en una balanza analítica (0.01 g) y se determinó el peso de la parte aérea y radical, por separado.

Análisis estadístico

Para todas variables se realizó el ANOVA y la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, con el paquete Statistical Analysis System (SAS).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de las variables de crecimiento

En el Cuadro 4.1 se presentan los valores medios de las variables de crecimiento evaluadas para los dos niveles de fertilización. La interacción tratamientos por niveles de fertilización presentó significancia para todas las variables evaluadas (altura, diámetro, biomasa aérea y radical, biomasa total y relación parte aérea/radicular) (Tukey (0.05). Para los niveles de fertilización se encontró alta significancia estadística en cada una de las variables de respuesta.

Cuadro 4. 1. Valores medios para las variables de crecimiento en *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. con y sin fertilización.

Fertilización	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa aérea (g)	Biomasa radical (g)	Biomasa total (g)	Relación parte aérea/radicular
Valor medio						
Con fertilizante	20.90 a	4.56 a	3.58 a	1.16 a	4.75 a	3.21 a
Sin fertilizante	15.10 b	2.98 b	1.51 b	0.76 b	2.18 b	1.98 b

Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Las variables evaluadas fueron superiores en los tratamientos con fertilizante (BCA+ C, M, BCA+M y C). Lo anterior concuerda con lo reportado por Lehmann *et al.*, (2007) quienes en experimentos con biocarbón obtuvieron una mejor respuesta cuando las plantas fueron fertilizadas.

En el Cuadro 4.2 se presentan los valores medios de las variables de crecimiento evaluadas para los cuatro tratamientos. La altura de planta, diámetro de tallo, biomasa aérea, radical y total fueron mayores en los tratamientos en los que se usó sustrato forestal solo (M) o combinado con biocarbón (BCA+M). De los resultados del Cuadro 4.2 se deduce el siguiente orden creciente para las variables evaluadas:

$$(M) \geq (BCA+M) > (BCA+C) = (C)$$

La adición de biocarbón al sustrato forestal (BCA+M) condujo a una disminución de altura, pero no hubo diferencia estadísticamente significativa para el diámetro y las biomasa aérea, radical y total. Las variables evaluadas no mostraron diferencias significativas como resultado de la adición de biocarbón al suelo forestal (BCA+C). La relación o proporción parte aérea/radicular no presentó diferencia significativa en todos los tratamientos y varió de 2.28 a 2.75 g. Un valor para esta relación mayor a uno, como es este caso, indica predominancia de la biomasa asociada a la parte subterránea. De acuerdo con Thompson, (1985) valores para esta

relación mayores al intervalo 1.5-2.5 indican que el sistema radical resulta insuficiente para proveer de energía a la parte aérea. En el presente estudio esta relación fue menor 2.5, para los tratamientos BCA+M y C. Por el contrario en los sustratos forestal solo (M) y la combinación de biocarbón con suelo (BCA+C) se supera el límite superior.

En las interacciones, se observó diferencias significativas para la altura, diámetro, biomasa aérea, biomasa total de las plantas, con respecto al tratamiento y la fertilización, también se encontró alta significancia entre la interacción tratamiento y fertilización (Cuadro 4.2). Para la biomasa radical no se encontró interacción entre el tratamiento y la fertilización, pero si para el efecto del tratamiento (0.0001) y fertilización (0.0006). Para la relación parte aérea/radicular, no se encontró efecto en el tratamiento, pero si en la fertilización (0.0004), tampoco la interacción causo efecto.

Se ha reportado que la fertilización, tiene un efecto significativo en las variables de crecimiento y la concentración de nutrimentos asimilados de la biomasa aérea en plantas de pino, *Pinus greggii* (Biederman *et al.*, 2013). El efecto de la fertilización en el crecimiento de especies vegetales desarrolladas en sustratos combinados con biocarbón es todavía polémico. Estudios realizados por Lehman, (2002) mostraron respuesta en el crecimiento de las plantas por la aplicación de fertilizante.

Este efecto también ha sido reportado en plantas ornamentales bajo condiciones de vivero, usando biocarbón mezclado con *peat moss* y perlita, donde se encontró efecto en el crecimiento (Altland y Locke, 2012), y en cebada fertilizadas donde se reportó un incremento significativo en su biomasa (Alcañiz *et al.*, 2012).

Cuadro 4. 2. Valores medios para las variables de crecimiento en *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en los tratamientos.

Tratamientos	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa aérea	Biomasa radica (g)	Biomasa total	Relación parte aérea/radicular
BCA +C	13.72 c	3.04 b	1.90 b	0.56 b	2.21 b	2.75 a
M	23.56 a	4.45 a	3.55 a	1.31 a	4.86 a	2.72 a
BCA +M	20.00 b	4.28 a	3.02 a	1.29 a	4.35 a	2.46 a
C	12.28 c	2.77 b	1.03 b	0.47 b	1.50 b	2.28 a
Significancia	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.670
Media	17.75	3.70	2.48	0.955	3.36	2.56
CV%	13.6	18.61	28.03	30.59	25.17	34.2
Trat.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.675
Fert.	0.0001	0.0001	0.0001	0.0006	0.0001	0.0004
Inte Trat. x Fert.	0.0032	0.051	0.037	0.080	0.0129	0.483
DMS (Trat.)	3.19	0.910	0.93	0.392	1.117	1.117
DMS (Fert.)	1.68	0.480	0.49	0.206	0.589	0.619

Trat: tratamientos, Fert: fertilizante, inte: interacción, BCA +C: biocarbón de bagazo de caña+ suelo forestal; M: sustrato forestal constituido por *peat moss*, agrolita, vermiculita y corteza de pino, 12.5%,12.5%, 25%, 50%; BCA+M: biocarbón de bagazo de caña + sustrato forestal; C: suelo forestal; Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

En el Cuadro 4.3 se presentan los valores medios de las variables de crecimiento evaluadas en los tratamientos con y sin fertilización. En los tratamientos no fertilizados no se obtuvo diferencia significativas para las variables evaluadas en los tratamientos con sustrato forestal solo (M) o combinado con biocarbón (CBA+M). Con estos tratamientos se obtuvieron valores medios más elevados que en los tratamientos en suelo solo (C) o combinado con biocarbón (BCA+C). Se ha reportado que la combinación de biocarbón con *peat moss* y perlita en relaciones 60 y 40 % (V/V) promueve el desarrollo de plantas con mayor altura, diámetro de tallo y longitud de raíz (Fascella, 2015).

Para los tratamientos sin fertilización se modificó el orden creciente definido para las variables evaluadas:

$$(M) = (BCA+M) \geq (C) \geq (BCA+C)$$

.....Lo anterior indica que la adición de biocarbón al suelo forestal (BCA+C) disminuye la altura y la biomasa total obtenida en el suelo (C). Contrariamente, las variables evaluadas en los tratamientos (CBA+M) y (M) no presentaron diferencias significativas. De igual forma, la relación parte aérea/ radicular no presentó diferencias significativas entre tratamientos.

La adición de fertilizante provocó cambios en el orden creciente de las variables evaluadas:

$$(M) = (BCA+M) \geq (BCA+C) \geq (C)$$

.....De acuerdo a Lehmann *et al.* (2002) la fertilización produce mejor efecto en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los tratamientos con sustrato forestal (M y BCA+M) continuaron siendo los que presentaron valores mayores de las variables evaluadas. Sin embargo, como resultado de la fertilización, la adición de biocarbón al suelo (BCA+C) condujo a un aumento de las variables altura, diámetro, biomasa aérea y biomasa total. En algunas plantas como el maíz, tomate, el zacate y el pino se ha reportado que el biocarbón favorece el desarrollo de la biomasa aérea, de la biomasa radical y la altura en alguna plantas en vivero y en campo (Lehmann *et al.*, 2003 y Novak *et al.*, 2009).

Plantas con mayor biomasa aérea presentan una mayor capacidad para almacenar carbohidratos (Prieto *et al.* 1999). Se ha señalado también que un aumento en el diámetro favorece el transporte de agua y nutrientes (Cleary *et al.*, 1978), lo que ayuda al desarrollo de la biomasa aérea (Krizek *et al.*, 1985).

La biomasa radical no presentó diferencias significativas por la adición de biocarbón al suelo (BCA+C y C) o al sustrato (BCA+M y M). De igual forma la relación parte aérea/radicular no mostró variación significativa para todos los tratamientos, lo cual también se observó en los tratamientos sin fertilizar.

Cuadro 4. 3. Efecto de la fertilización sobre los valores medios de las variables respuesta de crecimiento en los tratamientos evaluados.

Tratamientos	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa aérea (g)	Biomasa radical (g)	Biomasa total (g)	Relación parte aérea/radicular (g)
con fertilizante						
BCA+C	19.87 b	4.49 ab	3.52 ab	0.97 b	4.50 ab	3.51 a
M	24.75 a	4.95 a	4.70 a	1.40 a	6.10 a	3.43 a
BCA+ M	21.80 ab	4.80 a	3.90 ab	1.52 a	5.44 a	2.73 a
C	15.60 c	3.73 c	1.63 c	0.53 b	2.16 c	3.32 a
sin fertilizante						
BCA+ C	8.80 c	1.87 c	0.27 c	0.15 b	0.38 c	2.00 a
M	22.60 a	4.06 a	2.64 a	1.24 a	3.88 a	2.15 a
BCA+ M	18.20 ab	3.76 ab	2.14 ab	1.06 a	3.26 ab	2.18 a
C	9.75 b	2.05 bc	0.57 bc	0.42 b	1.00 d	1.49 a

BCA +C: biocarbón de bagazo de caña+ suelo forestal; M: sustrato forestal constituido por *peat moss*, agrolita, vermiculita y corteza de pino, 12.5%, 12.5%, 25%, 50%; BCA+M: biocarbón de bagazo de caña + sustrato forestal; C: suelo forestal; Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Los valores reportados para la biomasa aérea (3.52 y 4.70 g) y radical (0.97 a 1.52 g) en los tratamientos fertilizados desarrollados en sustrato forestal solo o combinado (M y BCA+M) y la combinación del biocarbón con suelo (BCA+C) son mayores a los reportados por Sáenz *et al.* (2013) (2.27 g para la biomasa aérea y 0.61 g para la radical) para *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. a edad de 9 meses. Estos mismos autores reportan valores de altura de 36.5 cm y de diámetro de 3.6 mm. De acuerdo con los resultados obtenidos los valores para estas variables evaluadas se clasifican como medios a altos.

En la Figura 4.1 se presenta la relación parte área/radicular de los tratamientos con y sin fertilización. Se deduce de la misma que la fertilización favoreció valores más altos para esta relación. Si bien no se obtuvo diferencias significativas para esta variable en todos los tratamientos, se nota en la Figura 1 una tendencia a valores más bajos en los tratamientos con biocarbón adicionado al suelo (BCA+C) o al sustrato forestal (BCA+M). Lo anterior indicaría que el biocarbón favorece el desarrollo radicular. Este efecto ha sido reportado en la literatura

para el caso de biocarbón de madera (Makoto *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2011). El desarrollo de raíces es muy importante en el suministro de nutrientes (Macklon *et al.*, 1994).

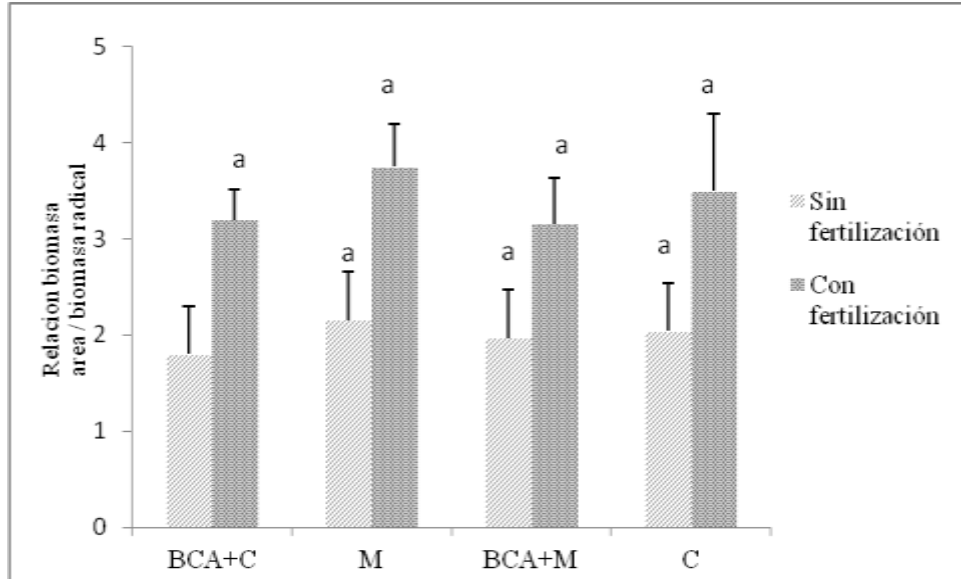


Figura 4. 1. Relación de la biomasa aérea/biomasa radical, en los niveles de fertilización para cada uno de los tratamientos de estudio a los 244 DDS.

Variabes nutrimentales interacción

Los porcentajes de nitrógeno, fósforo, calcio, potasio, magnesio y sodio en la biomasa aérea no presentaron diferencias significativas en los tratamientos evaluados BCA+C, C, BCA+M y M. Esto indica que la adición de biocarbón (BCA) al suelo (C) y al sustrato forestal (M) no tuvo ningún efecto sobre la concentración de estos elementos en la parte aérea (tallo, acículas).

Se observó diferencia significativa para la concentración de N, respecto al efecto que causaron los tratamientos (0.0001), fertilización (0.0001), como el efecto significativo de la interacción tratamiento y fertilización (0.0001). Para la concentración de P, la fertilización causó efecto en la concentración de este (0.0015), mientras que en la concentración de K, los tratamientos causaron efecto altamente significativo (0.021).

No se observó efecto ni por tratamiento, ni por fertilización y mucho menos por interacción en la concentración de Ca, Mg y Na (Cuadro 4.4).

Cuadro 4. 4. Concentración en biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., cultivado en diferentes tratamientos.

Tratamientos	N	P	K	Ca	Mg	Na
				(%)		
BCA +C	1.60a	0.18a	1.73a	0.59a	0.34a	0.045a
M	1.07c	0.20a	1.36ab	0.39ab	0.33a	0.04a
BCA +M	1.27bc	0.24a	1.25b	0.35b	0.36a	0.01a
C	1.45ab	0.18a	1.59ab	0.62a	0.38a	0.04a
Significancia	0.0008	0.4900	0.02	0.023	0.66	0.48
Media	1.34	0.209	1.46	0.48	0.35	0.03
CV%	18.0	45.9	21.1	35.8	22.5	98.0
Trat.	0.0008	0.49	0.021	0.006	0.66	0.48
Fert.	0.0001	0.0015	0.39	0.08	0.08	0.37
Inte Trat. x Fert.	0.0006	0.086	0.28	0.64	0.41	0.50
DMS (Trat.)	0.33	0.13	0.43	0.24	0.11	0.05
DMS(Fert.)	0.17	0.07	0.22	0.12	0.05	0.03

Trat: tratamientos, Fert: fertilizante, inte: interacción, BCA +C: biocarbón de bagazo de caña+ suelo forestal; M: sustrato forestal constituido por *peat moss*, agrolita, vermiculita y corteza de pino, 12.5%,12.5%, 25%, 50%; BCA+M: biocarbón de bagazo de caña + sustrato forestal; C: suelo forestal; Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Para la biomasa radical (Cuadro 4.5) el análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencia altamente significativa para los nutrientes N ($P=0.0001$), P ($P=0.0004$) y K ($P=0.0005$), no así para Ca, Mg y Na donde no se encontró significancia estadística.

El porcentaje de N fue mayor en la biomasa radical de los tratamientos que se desarrollaron en suelo forestal (C) o combinado con biocarbón (BCA+C). El contenido de nitrógeno en la raíz no presentó diferencias significativas por efecto de la adición de biocarbón al suelo (BCA+C) ni al tratamiento (BCA+M), lo cual estaría indicando que el biocarbón no aporta N. El contenido de P fue semejante en los tratamientos con biocarbón (BCA+C, BCA+M) y sustrato forestal (M) (0.32-0.36 %), pero mostró diferencia significativa en el tratamiento de suelo solo (C) donde se

obtuvo el de menor porcentaje (0.20% P). El biocarbón aportó P a la raíz. Los porcentajes más bajos de K (0.97-1.09%) se obtuvieron en los tratamientos sin biocarbón (C y M) y biocarbón combinado con sustrato forestal (BCA+M). La adición de biocarbón al suelo (BCA+C) aumentó el contenido de K en la raíz (1.40%). Se ha señalado que la adición de biocarbón aumenta la disponibilidad y absorción de los nutrientes por las plantas (Atkinson *et al.*, 2010). Los porcentajes de Ca, Mg y Na no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, lo que indica que la adición de biocarbón no aportó estos elementos a la raíz.

El efecto que causaron los tratamientos, fertilización e interacción en la parte radical, no se encontró diferencia significativa con respecto a la concentración de N, P, K, Ca, Mg y Na.

Investigadores como Carter *et al.* (2013) señalan lo contrario, reportando un incremento del 90% de la biomasa aérea, altura de planta y biomasa radical en *Lactuca sativa* y *Brassica chinensi* en tratamientos sin fertilización contra un porcentaje del 48% de incremento con fertilización. Otros trabajos reportan la necesidad de aplicar nutrientes como potasio (Yeager *et al.*, 2007) y fósforo Warncke (2011) para el buen desarrollo de plantas en viveros usando biocarbón como sustrato. Pero en ocasiones no se ha encontrado interacción entre el biocarbón y la adición de fertilizante.

Un análisis más detallado se presenta en los Cuadros 4.6 y 4.7 en los que se refiere el efecto de la fertilización sobre el contenido nutrimental en biomasa aérea y radical. Los resultados del Cuadro 4.6 indican que en los tratamientos sin fertilizante, el porcentaje de nitrógeno en la parte aérea (tallos y acículas) fue mayor en los tratamientos en suelo (BCA+C y C) (1.43-1.64 %) que en sustrato forestal (BCA+M y M) (0.79-0.81 %).

Cuadro 4. 5. Nutrimientos en biomasa radical de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. valores medios con fertilización y sin fertilización en los tratamientos.

Tratamientos	N	P	K	Ca	Mg	Na
				(%)		
BCA +C	1.60a	0.352a	1.40a	0.44ab	0.29a	0.19a
M	1.13b	0.316a	1.08b	0.33ab	0.33a	0.20a
BCA +M	1.15b	0.359a	0.97b	0.28b	0.28a	0.19a
C	1.55a	0.20b	1.09b	0.53a	0.33a	0.19a
Significancia	0.0001	0.0004	0.0005	0.0100	0.440	0.9900
Media	1.33	0.311	1.10	0.38	0.309	0.196
CV%	13.5	20.2	13.7	38.2	26.7	19.0
Trat.	0.0001	0.0004	0.0005	0.010	0.44	0.99
Fert.	0.0001	0.0001	0.162	0.026	0.0014	0.88
Inte Trat. x Fert.	0.253	0.826	0.126	0.527	0.53	0.99
DMS (Trat.)	0.230	0.092	0.22	0.22	0.1206	0.052
DMS(Fert.)	0.125	0.047	0.113	0.11	0.06	0.027

Trat: tratamientos, Fert: fertilizante, inte: interacción, BCA + C: biocarbón de bagazo de caña+ suelo forestal; M: sustrato forestal constituido por *peat moss*, agrolita, vermiculita y corteza de pino, 12.5%, 12.5%, 25%, 50%; BCA + M: biocarbón de bagazo de caña + sustrato forestal; C: suelo forestal; Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Sin embargo, no se presentaron diferencias significativas en nitrógeno por efecto de la adición de biocarbón al suelo (BCA+C) o al sustrato forestal (BCA+M). La adición de fertilizante aumentó el contenido de N en los tratamientos con sustrato forestal (BCA+M y M) (1.41-1.72 %). También condujo a diferencias significativas en el contenido de N como resultado de la adición de biocarbón al suelo (BCA+C y C) o al sustrato forestal (BCA+M y M). Se ha reportado que el biocarbón aumenta la eficiencia en los fertilizantes (Quirk *et al.*, 2012). En el caso del P en los tratamientos fertilizados no se observó diferencias significativas por efecto de la adición de biocarbón al suelo (C) o al sustrato forestal (M). Para el resto en la biomasa aérea, los elementos K, Ca, Mg y Na (en tratamientos con y sin fertilizante) y P (en tratamientos sin fertilizar) no presentaron diferencias significativas.

Cuadro 4. 6. Respuesta de la concentración de elementos nutrimentales en los tratamientos y niveles de fertilización para la biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl.

Tratamientos	Fertilización	Concentración (%)					
		N	P	K	Ca	Mg	Na
Biomasa aérea							
BCA+C	CF	1.50 a	0.18 c	1.57 a	0.54 a	0.33 a	0.04 a
M	CF	1.41 b	0.29 ab	1.32 a	0.27 a	0.29 a	0.04 a
BCA+M	CF	1.72 a	0.35 a	1.35 a	0.35 a	0.37 a	0.04 a
C	CF	1.48 b	0.21 bc	1.40 a	0.58 a	0.36 a	0.07 a
BCA+C	SF	1.64 a	0.19 a	1.95 a	0.66 a	0.41 a	0.04 a
M	SF	0.79 bc	0.16 a	1.40 a	0.49 a	0.37 a	0.04 a
BCA+M	SF	0.81 c	0.14 a	1.70 a	0.36 a	0.36 a	0.04 a
C	SF	1.43 ab	0.12 a	1.15 a	0.66 a	0.48 a	0.06 a

BCA+ C: Biocarbón de bagazo de caña+ Suelo forestal); M: *Peat moss*, Agrolita, Vermiculita y Corteza de pino, 12.5%,12.5%, 25%, 50%; BCA+ M: Biocarbón de bagazo de caña + *Peat moss*, Agrolita, Vermiculita y Corteza de pino, 12.5%,12.5%, 25%, 50%; C:Suelo forestal. CF= Con fertilización, SF= Sin fertilización. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

El análisis detallado del contenido nutrimental de la biomasa radical por efecto de la fertilización en los tratamientos evaluados se presenta en el Cuadro 4.7. Los resultados del Cuadro 4.8.0 indican que el porcentaje de nutrimentos evaluados en la biomasa radical en los tratamientos fertilizados y sin fertilización no presentó efecto significativo.

Esto indica que la adición de biocarbón al suelo (C) o al sustrato forestal (M) no tuvo ningún efecto sobre el contenido nutrimental en la raíz. Lo anterior indica que el los valores obtenidos para la relación biomasa aérea/radicular presentada en la Figura 4.1 se asocia a las variaciones producidas en la biomasa aérea, la cual si se ve modificada por el nitrógeno aportado por el fertilizante adicionado.

Cuadro 4. 7. Respuesta de las concentraciones de elementos nutrimentales en los tratamientos y fertilización para la biomasa radical de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl.

Tratamientos	Fertilización	Concentración (%)					
		N	P	K	Ca	Mg	Na
Biomasa radical							
BCA+C	CF	1.87 a	0.39 a	1.38 a	0.44 a	0.25 a	0.20 a
M	CF	1.47 a	0.45 a	1.13 a	0.27 a	0.24 a	0.20 a
BCA+M	CF	1.54 a	0.49 a	1.10 a	0.25 a	0.25 a	0.19 a
C	CF	1.77 a	0.34 a	1.00 a	0.41 a	0.27 a	0.19 a
BCA+C	SF	1.33 a	0.19 a	1.45 a	0.38 a	0.44 a	0.19 a
M	SF	1.39 a	0.20 a	1.05 a	0.38 a	0.39 a	0.20 a
BCA+M	SF	0.85 a	0.22 a	0.85 a	0.33 a	0.31 a	0.19 a
C	SF	0.79 a	0.100 a	1.13 a	0.65 a	0.38 a	0.19 a

BCA +C (Biocarbón de bagazo de caña +Suelo forestal); M (Peat moss, Agrolita, Vermiculita y Corteza de pino, 12.5%,12.5%, 25%, 50%); M+BCA (Peat moss, Agrolita, Vermiculita y Corteza de pino, 12.5%,12.5%, 25%, 50% + Biocarbón de bagazo de caña); C (Suelo forestal). CF= Con fertilización, SF= Sin fertilización. Medias con la misma literal son iguales estadísticamente (ANOVA), prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Los porcentajes 0.79 a 1.87% de nitrógeno en la biomasa área y radical para los tratamientos evaluados (BCA+C, M, BCA+M y C) se consideran bajos (en tratamientos sin fertilización) y óptimos (en tratamientos fertilizados) de acuerdo a lo reportado por Landis (1985) para coníferas. Este mismo autor indica que el rango óptimo de nitrógeno (N) es de 1.3 a 3.5% N. Se considera que porcentajes entre 1 y 2% de N son los que se reportan más frecuentemente en follaje de coníferas (Mead y Pritchett, 1975; Foster *et al.*, 1985; Millard y Proe, 1993). Sin embargo, se ha reportado que el porcentaje de N difiere según las especies de coníferas, y puede variar entre 1.7 y 2.3 % (Toral (1997).

La concentración de fosforo obtenida en las plantas *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., para los tratamientos en biomasa área y biomasa radical (BCA+C, M, BCA+M y C), con fertilizante y sin fertilizante de 0.12 a 0.49 %, fueron cercanos a 0.2 y 0.6% que es el rango considerado como adecuado según Landis (1985). Warncke (2011) sugiere que una cantidad de 6 a 10 mg de P, es suficiente para el crecimiento de las mayorías de las plantas en viveros usando biocarbón. Mientras que la concentración de potasio reportada entre 0.85 a 1.95 % es muy cercana al rango

0.7 a 2.5 % propuesto por Landis (1985) para el potasio en follaje de especies coníferas. El potasio al ser un elemento que requiere la planta en una mayor cantidad para la regulación de la turgencia de las células, y el potencial osmótico, afecta el crecimiento de la raíz. Yeager *et al.* (2007), mencionan que para un buen desarrollo de la planta se deben aplicar de 30 a 50 mg de K, para obtener un adecuado crecimiento de la planta, ya que el K, en el carbón no es suficiente.

Los porcentajes de calcio, magnesio y sodio se ubican dentro de los rangos reportados por Alcantar *et al.* (2007) para los cultivos en general, porcentajes para estos elementos no son muy disponibles ya que no se evalúan frecuentemente en coníferas.

CONCLUSIÓN

Los tratamientos en los que se usó sustrato forestal (M) solo o combinado con biocarbón (M y BCA+M) fueron los que presentaron los mayores valores para altura, diámetro de tallo, biomasa aérea, radical y total.

En tratamientos sin fertilización la adición de biocarbón de caña de azúcar al sustrato forestal (M) inhibe el desarrollo de *Pinus greggii* lo que se tradujo en menor altura respecto a la obtenida en el tratamiento testigo (M).

En tratamientos sin fertilización la adición de biocarbón de caña de azúcar al suelo inhibe el desarrollo del *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. lo que se traduce en una menor altura y biomasa total que el tratamiento testigo (C). El diámetro de tallo y las biomásas aérea, radical del *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., no presentaron efecto significativo por la adición de biocarbón al suelo siendo sus valores semejantes a los obtenidos en el testigo (C).

La dosis de biocarbón de diez por ciento combinado con suelo o sustrato forestal fue suficiente para obtener resultados aceptables en las variables evaluadas de crecimiento de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. Sin embargo, sería deseable probar otras dosis de biocarbón y fertilizante, y así como considerar evaluaciones a más largo plazo.

La adición de fertilizante a los tratamientos estudiados aumentó los valores obtenidos en altura, diámetro de tallo, biomasa aérea, radical y total, en los tratamientos testigos (M y C) y en aquellos en los que se combinó biocarbón con sustrato forestal (BCA+M) y suelo (BCA+C).

La fertilización promovió una mayor altura, biomasa aérea y radical en el tratamiento que se combinó biocarbón con suelo (BCA+C), semejante a las obtenidas en los tratamientos con sustrato forestal solo o combinado con biocarbón (M y BCA+M).

La relación parte aérea/radicular no varía por efecto de la adición de biocarbón al sustrato (M) o al suelo (C), ni por la adición de fertilizante. Existe una tendencia a que esta relación sea mayor en el sustrato forestal (M) y en el tratamiento en el que se combinó biocarbón con suelo (BCA+C) lo cual podría ocasionar problemas en el desarrollo futuro del *Pinus greggii* Engelm. ex Parl.

La fertilización promueve un aumento de N en la biomasa aérea al adicionar biocarbón al suelo (BCA+C) o al sustrato (BCA+M). Sin fertilización no hay ningún efecto en el contenido de N en la biomasa aérea resultante de la adición de biocarbón. Esto indicaría que el aumento de N en la biomasa aérea obedece a una respuesta a la fertilización nitrogenada, y no al aporte de N

proveniente del biocarbón. Esto confirmaría la estabilidad de N en el biocarbón de bagazo de caña de azúcar, tal como ha sido señalado en la literatura. Lo cual es como una ventaja de este material para ser usado en las propuestas para mitigar las emisiones de N₂O en proyectos de cambio climático.

El P, K, Ca, Mg y Na no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. La concentración de éstos en la biomasa aérea no se ve modificada ni por el nivel de fertilización ni por la adición de biocarbón.

El contenido nutrimental de N, P, K, Ca, Mg y Na en raíz no se ve afectado por la adición de biocarbón ni por los niveles de fertilización.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten proponer el uso de biocarbón elaborado a partir de residuos de bagazo de caña de azúcar (BCA) combinado con suelo o con el sustrato forestal evaluado como material para ser usado en viveros de árboles forestales.

El uso de biocarbón de caña de azúcar (BCA) como componente de sustratos para desarrollo de plantas en vivero puede ser una opción para reducir el costo asociado a la producción de árboles ya que se sustituiría o reduciría la cantidad de otros materiales que se usan actualmente como *peat moss*, agrolita, vermiculita.

LITERATURA CITADA

- Alcántar, G.G., L.I. Trejo-Téllez, P. Fernández, M.N. Rodríguez-Mendoza. 2007. Elementos Esenciales. In: Nutrición de Cultivos. Alcántar GG, Trejo-Téllez L. (eds). México, D.F.: Editorial Mundi-Prensa. 7-48.
- Alcañiz , J. M., P. Andrés, X. Domene, D. Paco y O. Ortiz. 2012. Efectos de dos tipos de biochar de pino sobre propiedades físicas del suelo y el desarrollo de la cebada. Universitat Autònoma de Barcelona, Cerdanyola del Vallès 08193, Spain. www.creaf.cat
- Altland, J.E. and J.C. Locke. 2012. Biochar affects macronutrient leaching from a soilless substrate. *HortScience* 47:1136-1140.
- Atkinson, C.J., J.D. Fitzgerald, and N.A. Hips. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant Soil* 337:1-18.
- Carriera, M., A. G. Hardieb, Ü. Urasa, J. Görgensa, J. H. Knoetze. 2012. Production of char from vacuum pyrolysis of South-African sugar cane bagasse and its characterization as activated carbon and biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 96: 24–32.
- Carter, S., Shackley S., Sohi S., Suy T.B., S. Haefele. 2013. The Impact of Biochar Application on Soil Properties and Plant Growth of Pot Grown Lettuce (*Lactuca sativa*) and Cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy* 3(2), 404-418.
- Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45 629-634.
- Cleary, B., R. Greaves and W. Owston. 1978. Seedlings. P. 63-98 in: Regenerating Oregon's Forests, B. D. Cleary, R. D. Greaves, and R. K. Hermann (eds.). Oregon State University Extension Service, Corvallis. 287 p.
- Clough, T.J. and L.M. Condron. 2010. Biochar and the nitrogen cycle. Introduction. *J. Environ. Qual.* 39:1218–1223.
- Dumroese, K.R., J. Heiskanen, K. Englund, and A. Tervahauta. 2011. Pelleted biochar: chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomass and Bioenergy* 35:2018–2027.
- Escalante R.M.A. 2014. Biocarbonos (Biochars), caracterización y efectos en la biomasa y nutrición de NPK en una gramínea. Colegio de Posgraduados. Texcoco, México. 124.
- Fascella, G. 2015. Growing Substrates Alternative to Peat for Ornamental Plants. Capítulo 3 de la 48-65. In *Soilless Culture – Use of Substrates for the Production of Quality Horticultural Crops* ISBN 978-953-51-1739-1, 172.

- Foster, N. W., E. G. Beauchamp, and C. T. Corke. 1985. Immobilization of nitrogen-15-labelled urea in a Jack pine forest floor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 448-452.
- García-Figueroa, M., and J. J. Vargas-Hernández. 2000. Growth and biomass allocation of *Gliricidia sepium* seed sources under drought conditions. *J. Sustainable For.* 10: 45-50.
- Iederman, L. A., B. And W. S. Harpole. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis *GCB Bioenergy* 5:202–214.
- Inyang M., B. Gao, W. Ding, P. Pullammanappallil, A. R. Zimmerman and X. Cao. 2012. Enhanced Lead Sorption by Biochar Derived from Anaerobically Digested Sugarcane Bagasse. *Separation Science and Technology* 46: 1950–1956.
- Kadota, M. and Y. Niimi. 2004. Effects of charcoal with pyroligneous acid and barnyard manure on bedding plants. *Sci. Hort.* 101:327–332.
- Kiatkittipong, W., Wongsuchoto P., P. Pavasant. 2009. Life cycle assessment of bagasse waste management options. *Waste Management* 29: 1628–1633.
- Krizek, D. T., A. Carmi, R. M. Mirecki, F. W. Snyder, and J. A. Bunce. 1985. Comparative effects of soil moisture stress and restricted root zone volume on morphogenetic and physiological responses of Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. *J. Exp. Bot.* 36: 25-38.
- Laird, D., P. Fleming, B. Wang, R. Horton, D. Karlen. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158, 436-442.
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. In: Duryea, M. L. (ed.). *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major test.* Oregon State University. Corvallis, OR, USA. pp. 29-48.
- Lehmann J., M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday, D. Crowley. 2011. “Biochar effects on soil biota- a review”. *Soil Biology and Biochemistry* 43 1812-1836.
- Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black, *Frontiers in Ecology and the Environment* 5:381–387.
- Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. biochar para la gestión ambiental: una introducción. En: Lehmann, J., Joseph, S. (eds.), *Biochar para la Gestión Ambiental: Ciencia y Tecnología*, Earthscan, Londres. pp 1-12.
- Lehmann, J., da Silva Jr, J.P., Rondon M., Cravo M.S., Greenwood J., Nehls T., Steiner C. and B. Glaser. 2002. ‘Slash-and-char – a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon?’, *Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science*, (pp. 1–12) Bangkok, Thailand. CD-ROM Paper no. 449.
- Lehmann, J., da Silva, J. Steiner, C. Nehls, T. Zech, W. 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 and Soil* 249, 343-357.

- Liu, X.H., Han F.P., X.C. Zhang. 2012. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: Results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture & Biology*, pp. 975-979.
- Macklon, A. E. S., L. A. Mackie Dawson, A. Sin, C. A. Shand, and A. Lylli. 1994. Soil P resources, plant growth and rooting characteristics in nutrient poor upland grasslands. *Plant Soil* 163: 257- 266.
- Makoto, K., Choi D., Hashidoko Y., T. Koike. 2010. The growth of *Larix gmelinii* seedlings as affected by charcoal produced at two different temperatures. *Biol Fert Soils* 47:467–472.
- Mead, D. J., and W. L. Pritchett. 1975. Fertilizer movement in a slash pine ecosystem. II. N distribution after two growing seasons. *Plant and Soil* 43: 467-478.
- Millard, P., and M. F. Proe. 1993. Nitrogen uptake, partitioning and internal cycling in *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. as influenced by nitrogen supply. *New Phytology* 125: 113-119.
- Nelson, P.V. 2012. Greenhouse operation and management. 7th ed. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Northup, J.I. 2013. Biochar as a replacement for perlite in greenhouse soilless substrates. Iowa State Univ., Ames, M.S. Thesis 13399.
- Northup, J.I., R.J. Gladon, and D.A. Laird. 2013. pH and physical properties show biochar can replace perlite in greenhouse substrates. A manuscript to be submitted to HortScience.
- Novak, J.M., Busscher W.J., Laird D.L., Ahmedna M., Watts D.W., M.A.S. Niandou. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science* 174,105-112.
- Prieto, R. J.A., G. C. Vera y E. B. Merlin. 1999. Factores que influyen en la calidad de brinzales y criterios para su evaluación en vivero. Folleto Técnico N° 12. Campo experimental Valle del Guadiana. INIFAP. Durango, México. 23 p.
- Quirk R. G., L. Van Zwieten , S. Kimber , A. Downie, S. Morris and J. Rust. 2012. Utilization of Biochar in Sugarcane and Sugar-Industry Management. *Sugar Tech* 14(4):321–326.
- Sáenz, R. J. T., H. J. F. Muñoz, C. M. Á. D. Pérez., A. R. Sánchez y J. R. Hernández. 2014. Plant quality of three pine species of “Morelia” nursery at Michoacán state. *Rev. Mex. Cien. For.* Vol. 5 Núm. 26.
- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphological evaluation- what you can tell by looking? In: *Proceedings: evaluation seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of mayor test.* Duryea, M. L. (ed.). Oregon State University. Corvallis, Oregon.U.S.A. pp: 59-71.

- Toral, I. 1997. Concepto de calidad de plantas en viveros forestales. Documento Técnico 1. Programa de Desarrollo Forestal Integral de Jalisco. Guadalajara, México. 26 p.
- Verheijen, F.G.A., S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde, and I. Diafas. 2010. Biocarbón Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24099 – EN, Italy .149p.
- Warncke, D. 2011. Greenhouse root media, p. 61– 64. In: Brown, J.R. (ed.). Recommended chemical soil test procedures for the north central region. North Central Reg. Res. Pub. No. 221. Miss. Agr. Expt. Stat. SB 1001.
- Yeager, T.H., C.H. Gilliam, T.E. Bilderback, D.C. Fare, A.X. Niemiera, and K.M. Tilt. 2007. Best management practices: Guide for producing nursery crops. Southern Nursery Assoc., Atlanta, GA.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES GENERALES

- El aserrín de pino y el bagazo de caña de azúcar son dos residuos importantes que se generan en nuestro país, por lo que es deseable crear innovaciones que permitan dar un valor agregado a los mismos.
- La pirolisis a alta temperatura (600 °C) de bagazo de caña de azúcar y de aserrín de pino puede llevarse a cabo en el pirolizador artesanal evaluado.
- La naturaleza de la biomasa, bagazo de caña de azúcar y aserrín de pino, tuvo efectos significativos en las características físico-químicas de los biocarbones elaborado por pirolisis a alta temperatura (600 °C).
- El biocarbón de bagazo de caña de azúcar presentó las concentraciones más altas de N, P, K, Ca, Mg y Na total.
- La concentración de N, P, K, Ca, Mg y Na total en los biocarbones de aserrín de pino fue menor que las obtenidas en biocarbón de bagazo de caña de azúcar.
- El tamaño de partícula, grueso o fino, del aserrín de pino tuvo efectos significativos en el contenido de nitrógeno.
- El tipo de material usado para elaborar los biocarbones no afectó el contenido nutrimental en biomasa aérea y radicular, ni las variables de crecimiento evaluadas, con excepción de la altura.

- Las variables de crecimiento evaluadas y la concentración nutrimental en la biomasa aérea y radicular, no son afectadas por el tamaño de partícula usado para elaborar biocarbones de aserrín de pino.
- La combinación de biocarbón de bagazo de caña de azúcar con suelo o con el sustrato forestal (*Peat moss* con agrolita y vermiculita) favoreció la disponibilidad de nitrógeno.
- La propiedad del biocarbón de retener nutrientes como fue el caso del fósforo, en la combinación biocarbón de bagazo de caña de azúcar con suelo forestal limita el desarrollo de la biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm Ex Parl en la etapa de vivero. Sin embargo podría ser un factor importante para su desarrollo futuro en campo.
- La relación parte área/radicular obtenida para *Pinus greggii* Engelm Ex Parl no fue un buen indicador del desempeño de los biocarbones probados en vivero ya que esta relación no varió ni por efecto del material, ni por el tamaño de partícula de los residuos usados para elaborar los biocarbones. Siempre se mantuvo dentro de lo recomendado por Thompson (1985) para un adecuado desarrollo de plántulas forestales.
- Residuos como bagazo de caña de azúcar y aserrín de pino combinados con suelo pueden ser usados, como sustratos de *Pinus greggii* Engelm Ex Parl en vivero.
- El biocarbón de bagazo de caña de azúcar puede sustituir a sustratos comerciales como la mezcla de *Peat moss* con agrolita, vermiculita y corteza de pino, materiales que son de un alto costo.
- El biocarbón o biochar no ha sido considerado como una alternativa para ser usado como sustrato en el desarrollo de plántulas de árboles forestales en vivero, debido a que su conocimiento es reciente. Sin embargo, este material representa una alternativa potencial como componente de sustrato.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que en experimento futuro de biocarbón con árboles forestales en viveros se evalúen los experimentos por más de 12 a 14 meses. porque es el tiempo recomendado por los viveristas para llevar acabo el trasplante y el árbol tiene la capacidad de sobrevivir a diferentes factores ambientales.
- Se propone evaluar diferentes combinaciones de biocarbón con diferentes materiales usados como sustrato y variar las relaciones de combinación.
- Se recomienda darle una mayor importancia a la evaluación de las propiedades físicas de las combinaciones del biocarbón con otros materiales que sean usados como sustratos.
- Se considera que es suficiente evaluar solamente las concentraciones nutrimentales de N, P, K., en la biomasa aérea de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. como criterios nutrimentales en evaluaciones de experimentos en viveros.
- Se recomienda evaluar el crecimiento radicular de la planta de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en las combinaciones del biocarbón con otros materiales, principalmente la raíz pivotante y la ramificación de ésta.
- Sería deseable continuar el experimento en campo con objeto de evaluar otras variables, como la captura carbono, capacidad de retención de nutrientes, sobre todo los provenientes de la mineralización de la materia orgánica y el efecto del biocarbón en la sobrevivencia de los arboles *Pinus greggii* Engelm. ex Parl.

ANEXOS

1. Base de datos de SAS

```

Data lup;
input NUM TRA      SUS   TAM   REP   ALT   DIAM   BAREA  BRAIZ  NH     NR     PH
      pR    Cah    CaR   MgH   MgR   NaH   NaR   KH    KR    CTNH  CTPH  CTCaH
      CTMgH CTNaH CTKH  CTNR CTPR  CTCaR CTMgR CTNaR CTKR;
cards;
1  1  1  4  1  10  1.9  0.2  0.1  1.75  1.30  0.27  .
  0.67  .  0.36  .  .  .  2.20  .  0.0035 0.0005 0.0013 0.0007 .
  0.0044 0.0013 .  .  .  .
2  1  1  4  2  7  2.1  0.3  0.2  1.41  1.46  .  .
  0.84  .  0.44  0.21  0.030 0.195 2.20  0.70  0.0042 .  0.0025 0.0013
  0.0001 0.0066 0.0029 .  .  0.0004 0.0004 0.0014
3  1  1  4  3  6.5  1.8  0.2  0.2  1.41  1.32  0.01  .
  0.68  .  0.40  .  0.070  .  1.95  .  0.0028 .  0.0014 0.0008
  0.0001 0.0039 0.0026 .  .  .  .
4  1  1  4  4  13.5  1.7  0.3  0.1  1.74  1.21  0.06  .  .
  0.82  .  .  .  .  .  .  .  0.0052 0.0002 .  .  .
  0.0012 .  0.0008 .  .  .
5  1  1  4  5  7.5  2.0  0.4  0.2  1.43  1.42  .  0.19  .
  .  .  0.44  .  0.320  .  1.45  0.0057 .  .  .  .
  0.0028 0.0004 .  0.0009 0.0006 0.0029
6  1  1  4  6  7  2.1  0.1  0.2  1.74  1.28  0.01  .
  1.15  .  0.61  .  0.145  .  2.95  .  0.0017 .  0.0011 0.0006
  0.0001 0.0030 0.0026 .  .  .  .
7  1  1  4  7  10  2.0  0.3  0.1  1.71  1.33  0.31  .
  0.64  .  0.46  .  0.035  .  1.70  .  0.0051 0.0009 0.0019 0.0014
  0.0001 0.0051 0.0013 .  .  .  .
8  1  1  4  8  10  1.8  0.1  0.1  1.72  1.23  0.13  .
  0.82  .  0.44  .  0.025  .  1.95  .  0.0017 0.0001 0.0008 0.0004 .
  0.0020 0.0012 .  .  .  .
9  1  1  4  9  10  1.8  .  .  1.94  1.34  .  .  .
  .  .  .  0.030 0.060  .  .  .  .  .  .  .
  .  .  .  .  .  .
10 1  1  4  10  7.5  2.0  0.3  0.1  1.66  1.10  0.08  .
  0.88  .  0.52  .  0.048  .  2.45  .  0.0050 0.0002 0.0026 0.0016
  0.0001 0.0074 0.0011 .  .  .  .
1  2  2  4  1  7  1.5  0.2  0.2  2.40  1.50  0.04  .
  0.30  .  0.21  .  0.004  .  1.15  .  0.0048 0.0001 0.0006 0.0004 .
  0.0023 0.0030 .  .  .  .
2  2  2  4  2  7  1.8  0.2  0.2  2.14  1.13  0.20  0.14
  0.70  0.40  0.43  0.13  0.033 0.158 1.85  0.45  0.0043 0.0004 0.0014 0.0009
  0.0001 0.0037 0.0023 0.0003 0.0008 0.0003 0.0003 0.0009
3  2  2  4  3  6.5  2.2  0.3  0.1  1.76  1.25  0.26  0.09
  0.76  0.26  0.44  0.17  0.050 0.088 2.28  0.70  0.0053 0.0008 0.0023 0.0013
  0.0001 0.0068 0.0013 0.0001 0.0003 0.0002 0.0001 0.0007
4  2  2  4  4  5  1.4  0.1  0.1  1.03  2.37  0.20  0.24  .
  0.35  .  0.30  .  0.190  .  0.95  0.0010 0.0002 .  .  .
  0.0024 0.0002 0.0004 0.0003 0.0002 0.0010

```

5	2	2	4	5	6	1.6	0.3	0.1	1.15	0.97	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	0.0035	.	.	.	.	.
	0.0010	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
6	2	2	4	6	7	1.7	0.2	0.1	2.41	1.34	0.06	.	.
	0.88	.	0.51	.	0.039	.	1.70	.	0.0048	0.0001	0.0018	0.0010	.
	0.0001	0.0034	0.0013	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
7	2	2	4	7	6	1.8	0.1	0.3	2.17	1.34	0.06	.	.
	0.60	.	0.38	.	0.035	.	1.70	.	0.0022	0.0001	0.0006	0.0004	.
	0.0017	0.0040	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
8	2	2	4	8	7	1.6	0.1	0.3	1.98	1.17	.	0.01	.
	0.53	.	0.30	.	0.145	.	0.95	0.0020	.	.	.	.	.
	0.0035	.	0.0016	0.0009	0.0004	0.0029	.	.	.	.	.	.	.
9	2	2	4	9	5	1.6	0.2	0.1	1.91	0.87	0.05	.	.
	0.52	.	0.29	.	0.023	.	1.20	.	0.0038	0.0001	0.0010	0.0006	.
	0.0024	0.0009	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
10	2	2	4	10	7	2.0	0.3	0.2	1.84	1.22	.	.	.
	0.35	.	0.24	.	0.014	.	1.45	.	0.0055	.	0.0010	0.0007	.
	0.0044	0.0024	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1	3	3	4	1	7.5	1.9	0.4	0.2	1.88	1.44	0.33	0.03	.
	1.11	1.11	0.57	0.32	0.068	0.195	2.70	0.95	0.0075	0.0013	0.0045	0.0023	.
	0.0003	0.0108	0.0029	0.0001	0.0022	0.0006	0.0004	0.0019	.	.	.	.	.
2	3	3	4	2	6.5	1.7	0.2	0.1	1.19	1.11	.	0.05	.
	0.63	0.62	0.35	0.44	0.005	0.195	1.70	1.20	0.0024	.	0.0013	0.0007	.
	0.0034	0.0011	.	0.0006	0.0004	0.0002	0.0012	.	.	.	.	.	.
3	3	3	4	3	11.5	1.0	0.5	0.6	1.22	1.22	0.08	0.11	.
	0.46	0.46	0.39	0.44	0.013	0.195	1.45	1.20	0.0061	0.0004	0.0023	0.0020	.
	0.0001	0.0073	0.0073	0.0007	0.0028	0.0027	0.0012	0.0072	.	.	.	.	.
4	3	3	4	4	14	2.8	0.8	0.6	1.99	1.19	0.21	0.17	.
	0.46	0.46	0.40	0.44	0.023	0.195	1.20	1.20	0.0159	0.0017	0.0037	0.0032	.
	0.0002	0.0096	0.0071	0.0010	0.0028	0.0027	0.0012	0.0072	.	.	.	.	.
5	3	3	4	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.

6	3	3	4	6	7	1.7	3.0	0.1	1.60	1.33	.	0.13	.
	0.59	0.58	0.44	0.19	0.035	0.103	1.45	0.70	0.0479	.	0.0176	0.0131	.
	0.0011	0.0435	0.0013	0.0001	0.0006	0.0002	0.0001	0.0007	.	.	.	.	.
7	3	3	4	7	11	2.5	0.7	0.5	1.41	1.39	0.16	0.22	.
	0.65	0.65	0.40	0.32	0.025	0.195	1.45	1.20	0.0099	0.0011	0.0046	0.0028	.
	0.0002	0.0102	0.0070	0.0011	0.0032	0.0016	0.0010	0.0060	.	.	.	.	.
8	3	3	4	8	10.5	2.0	0.5	0.1	1.63	1.44	0.18	.	.
	0.31	0.30	0.27	.	0.003	.	1.20	.	0.0081	0.0009	0.0015	0.0013	.
	0.0060	0.0014	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
9	3	3	4	9	9	2.8	0.7	0.4	1.22	1.52	0.09	0.06	.
	0.42	0.42	0.27	0.44	0.002	0.195	1.20	1.20	0.0085	0.0006	0.0029	0.0019	.
	0.0084	0.0061	0.0003	0.0017	0.0018	0.0008	0.0048	.	.	.	.	.	.
10	3	3	4	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.


```

PROC GLM;
CLASS SUS TAM;
MODEL ALT    DIAM  BAREA  BRAIZ  NH      NR      PH      pR      Cah    CaR    MgH    MgR
      NaH    NaR   KH      KR      CTNH   CTPH   CTCaH  CTMgH  CTNaH  CTKH  CTNR  CTPR
      CTCaR  CTMgR  CTNaR  CTKR=SUS TAM  SUS*TAM;

```

MEANS SUS TAM SUS*TAM/TUKEY LINES;

RUN;

2. Análisis de ANOVA para las variables de crecimiento y concentración de nutrientes en biomasa aérea y radicular.

Altura de planta

FV	GL	SC	CM	F Value	Pr > F
Model	11	3744.440994	340.403727	51.98	<.0001
Error	91	595.971627	6.549139		
Corrected Total		102	4340.412621		
R-Square	Coeff Var	Root MSE	ALT3 Mean		
0.862692	16.02372	2.559129	15.97087		

Interacción

FV	GL	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SUS	5	2145.665174	429.133035	65.53	<.0001
FERT	1	1357.993014	1357.993014	207.35	<.0001
SUS*FERT	5	240.782806	48.156561	7.35	<.0001

Diámetro de planta

FV	GL	SC	CM	F Value	Pr > F
Model	11	136.1014745	12.3728613	27.66	<.0001
Error	91	40.7111468	0.4473752		
Corrected Total	102	176.8126214			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	DIAM3 Mean		
0.769750	19.50529	0.668861	3.429126		

Interacción

FV	GL	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SUS	5	50.10709594	10.02141919	22.40	<.0001
FERT	1	75.84544529	75.84544529	169.53	<.0001
SUS*FERT	5	10.14893330	2.02978666	4.54	0.0010

Biomasa aérea

FV	GL	SC	CM	F Value	Pr > F
Model	11	215.5554298	19.5959482	36.79	<.0001
Error	89	47.4039762	0.5326289		
Corrected Total	100	262.9594059			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	BAREA Mean		
0.819729	33.76603	0.729814	2.161386		

Interacción

FV	GL	Type I SS	CM	F Value	Pr > F
SUS	5	78.2166850	15.6433370	29.37	<.0001
FERT	1	131.1925339	131.1925339	246.31	<.0001
SUS*FERT	5	6.1462108	1.2292422	2.31	0.0508

Biomasa radical

FV	GL	SC	CM	F Value	Pr > F
Model	11	19.30234037	1.75475822	18.89	<.0001
Error	89	8.26811508	0.09290017		
Corrected Total	100	27.57045545			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	BRaíz Mean		
0.700110	37.93976	0.304795	0.803366		

Interacción

FV	GL	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SUS	5	11.19415325	2.23883065	24.10	<.0001
FERT	1	6.01228135	6.01228135	64.72	<.0001
SUS*FERT	5	2.09590577	0.41918115	4.51	0.0010

Nitrógeno en la biomasa aérea

FV	GL	SC	CM	F VALUE	PR > F
Model	11	17.92641520	1.62967411	20.69	<.0001
Error	90	7.09065147	0.07878502		
Corrected Total	101	25.01706667			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	NH Mean		
0.716567	17.61632	0.280687	1.593333		
FV	GL	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SUS	5	11.77950900	2.35590180	29.90	<.0001
FERT	1	4.03347214	4.03347214	51.20	<.0001
SUS*FERT	5	2.11343406	0.42268681	5.37	0.0002

Nitrógeno en la raíz

FV	GL	SC	CM	F Value	Pr > F
Model	11	16.92410551	1.53855505	17.98	<.0001
Error	90	7.70303175	0.08558924		
Corrected Total	101	24.62713725			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	NR Mean		
0.687214	20.44727	0.292556	1.430784		
Interacción					
FV	GL	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SUS	5	5.35172191	1.07034438	12.51	<.0001
FERT	1	11.40261083	11.40261083	133.22	<.0001
SUS*FERT	5	0.16977278	0.03395456	0.40	0.8499

Fósforo en la biomasa aérea

FV	GL	SC	CM	F Value	Pr > F
Model	11	0.40347767	0.03667979	4.99	<.0001
Error	80	0.58797016	0.00734963		
Corrected Total	91	0.99144783			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	PH Mean		
0.406958	45.59050	0.085730	0.188043		

Interacción

FV	DF	Type I SS	CM	F Value	Pr > F
SUS	5	0.10009257	0.02001851	2.72	0.0253
FERT	1	0.25633934	0.25633934	34.88	<.0001
SUS*FERT	5	0.04704576	0.00940915	1.28	0.2807

Fósforo en la biomasa radical

FV	GL	SC	CM	F Value	Pr > F
Model	11	1.64528826	0.14957166	32.78	<.0001
Error	74	0.33768500	0.00456331		
Corrected Total	85	1.98297326			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	PR Mean		
0.829708	21.58861	0.067552	0.312907		

Interacción

FV	GL	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SUS	5	0.18168808	0.03633762	7.96	<.0001
FERT	1	1.38535118	1.38535118	303.58	<.0001
SUS*FERT	5	0.07824900	0.01564980	3.43	0.0077

Calcio en la biomasa aérea

FV	GL	SC	CM	F Value	Pr > F
Model	11	2.13011893	0.19364718	8.70	<.0001
Error	81	1.80256063	0.02225383		
Corrected Total	92	3.93267957			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	CaH Mean		
0.541646	32.03297	0.149177	0.465699		

Interacción

FV	GL	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
SUS	5	0.95914026	0.19182805	8.62	<.0001
FERT	1	0.90548162	0.90548162	40.69	<.0001
SUS*FERT	5	0.26549705	0.05309941	2.39	0.0452

3. Análisis físico-químicos de los biocarbones

Cuadro 1A. Características físico-químicas de los biocarbones.

BIO	pH	CIC	C	Nt	Pt	K	Ca	Mg	Na	Materia volátil	Cenizas	Humedad
BCA	9.40b	1.30b	81.8	0.60c	0.16b	0.50ab	0.74b	0.74b	0.31a	2.5	15.1	0.2
PCA	10.50a	2.00ab	70.4	0.30c	0.25a	0.96a	0.99a	0.99a	0.22a	2.3	25.4	0.1
APFB	7.60d	1.00b	88.7	3.82a	0.02c	0.12b	0.26d	0.26d	0.16ab	2.3	2.8	0.1
APFA	8.00c	1.32b	90.2	3.34b	0.02c	0.11b	0.20d	0.20d	0.17ab	2.4	2.0	0.1
APGB	7.13e	1.40b	90.8	0.20c	0.02c	0.14b	0.19d	0.19d	0.02b	3.0	1.7	0.1
APGA	7.20e	1.00b	93.7	0.20c	0.02c	0.22b	0.05e	0.05e	0.01b	2.8	1.7	0.1
AEGB	6.62f	3.00a	40.14	0.60c	0.16b	0.33b	0.54c	0.54c	0.01b	2.4	42.7	0.1

BIO: Biocarbón; pH (H₂O) (1:1); CIC: AcONH₄ 1N, pH 7 (cmol⁺ kg⁻¹): Bagazo de caño alta (BCA) Paja de caña alto (PCA), Aserrín pino fino baja (APFB), Aserrín de pino fino alto (APFA), Aserrín de pino grueso baja (APGB), Aserrín de pino grueso alto (APGA), Eucalipto grueso baja (AEGB). Medias con misma letra no son significativas P 0.05 prueba de Tukey.

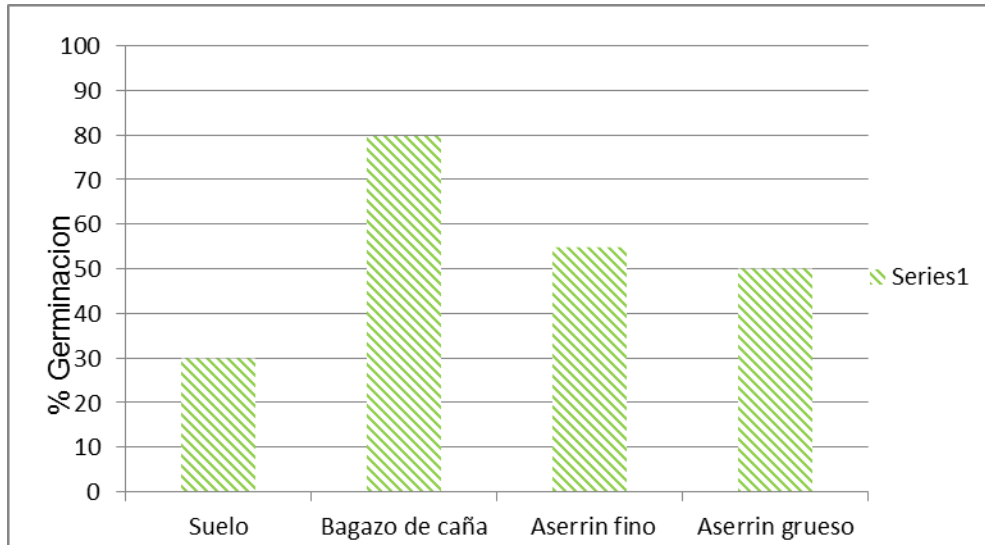
Cuadro 2A. Parámetros físicos de acuerdo a De Boedt y Verdonck (1972), Cappaert I. (1994) para sustratos.

Material	Temp. °C	D. aparente g.cm ³	EPT	CA %	RH
BCA	600	0.15	81	14	67
PCA	600	0.18	76	15	61
APFB	300	0.28	73	19	54
APFA	600	0.29	77	23	55
APGB	300	0.22	77	18	60
APGB	600	0.20	83	15	68

Bagazo de caño alta (BCA) Paja de caña alto (PCA), Aserrín pino fino baja (APFB), Aserrín de pino fino alto (APFA), Aserrín de pino grueso baja (APGB), Aserrín de pino grueso alto (APGA), Eucalipto grueso baja (AEGB). Temp: Temperatura, D. aparente: densidad aparente, EPT: espacio poroso total, CA: Capacidad de aire, RH: retención de humedad

4. Prueba de germinación de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en los biocarbones elaborados

Figura 1A. Prueba de germinación



5. Porosidad de biocarbones observada con microscopio electrónico de barrido (MEB)

B

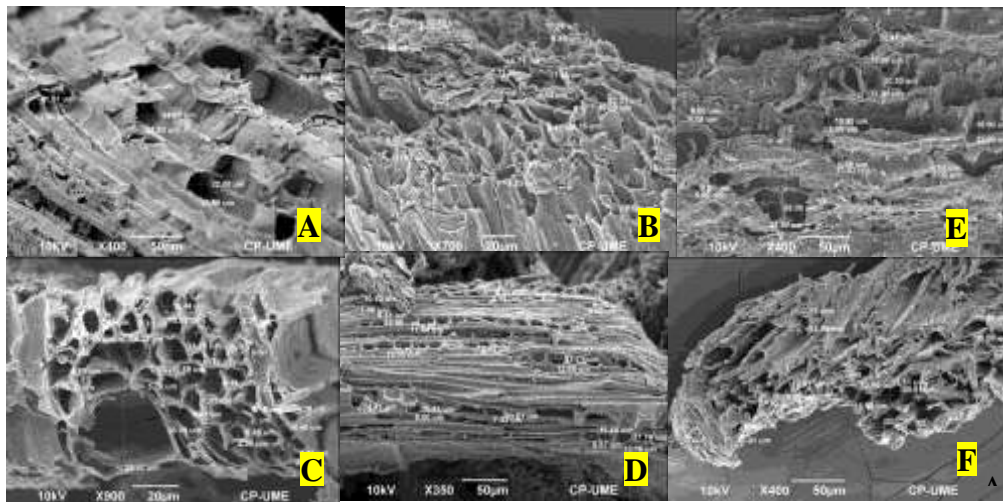


Figura 1A. Microfotografía electrónica de barrido de: aserrín fino (300 y 600°C) (A, B), aserrín grueso (300 y 600°C) (C y D), eucalipto (E) (300°C), bagazo de caña de azúcar (F) (600°C).