



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE ARROZ Y
ÁPICES DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL
CRECIMIENTO DE LECHUGA, ALBAHACA
Y PEPINO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
DESARROLLO RURAL**

P R E S E N T A:

CARLOS ALBERTO PEREZ CABRERA

CODIRECTORES DE TESIS

Dr. Porfirio Juárez López

Dr. José Anzaldo Hernández



Cuernavaca, Morelos. Agosto de 2021



FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
JEFATURA DE PROGRAMAS EDUCATIVOS DE POSGRADO

Cuernavaca, Morelos, 09 de agosto de 2021.

Asunto: Voto Aprobación de Tesis.

**DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ
DR. IRÁN ALIA TEJACAL
DR. DAGOBERTO GUILLEN SÁNCHEZ
DR. ROGELIO CASTRO BRINDIS
DR. EDUARDO SALCEDO PÉREZ
DR. ROSENDO BALOIS MORALES
DR. VÍCTOR LÓPEZ MARTÍNEZ
COMITÉ EVALUADOR
P R E S E N T E.**

Por medio del presente informo a usted que después de revisar el trabajo de tesis titulado: **“BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE ARROZ Y ÁPICES DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL CRECIMIENTO DE LECHUGA, ALBAHACA Y PEPINO”** que presenta el: **M. C. CARLOS ALBERTO PEREZ CABRERA**, mismo que fue desarrollado bajo la dirección del **DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ** y la Codirección del **DR. JOSÉ ANZALDO HERNÁNDEZ** y que servirá como requisito parcial para obtener el grado de **Doctor en Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural**, lo encuentro satisfactorio, por lo que emito mi **VOTO DE APROBACIÓN** para que el alumno continúe con los trámites necesarios para presentar el examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano su valiosa colaboración, quedo de usted.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

DR. PORFIRIO JUÁREZ LÓPEZ
Comité Evaluador

C.i.p. Archivo

Av. universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México 62209
Tel (777)3297046, 3297000 Ext. 3304. fagropecuarias@uaem.mx



Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

PORFIRIO JUAREZ LOPEZ | Fecha: 2021-08-22 21:26:06 | Firmante
 vUQrC BSHtYjINW9AMR3A3gQFN0VZJ1o bdtu 13L8ALAJiaEPlyh8BvN OYmUDP5y3CFM9hNdkC/M6VXmzLUIYYyMC R5oi8B8PrNzyngovDnqE U9oqQGV8IEgK2pgNZHvY4 3310+ImZR+UosndfVc+1Kxy3ZJSD1rDronLUEXryl1N/ELockpo7xgru4g97qmMeR5Kc5MX0ATs2+wy5bu69XhoxTuhZV554p7AryzkHdeU9o3wflwKqz5q5oWp hGNDBQg4FK B4Qv18U TxiJbnhGr3ML6hyMBVQx0aHfJ1JNKySQJrxXZ47 r2rdAFT HgWjmcqphw==

IRAN ALIA TEJACAL | Fecha: 2021-08-22 21:36:25 | Firmante
 NRQcQp9TKVxiOgoZYFMXrInajJOn eZ7 NP84E+usFfeE/UHDM5dWzMQbPKvbdYOXorFUo7yaBglMUEJMC SWHwsw6Fc3Nbxo pW8eKH9 yJ R65+MPJ6gF00Vj b1pOFG6AzVf 4IpeZNS4u90S O QwBH0uMw73l SrmfR EgrzDhFUMSezV1xwMGAzhcSWBKAphqXKTZHK36jBzdzW7 j7d qMgPxm4PLte7RdfvZwLnEY a97 0m34g5uYw dlhsdEY00hDn5FcAd IQEIDE6D TWyjt0cgrZFzOaylpYeeR9buOwZEEkq7 4yztQ9rdsV05rjD LFAya4WjQ==

ROGELIO CASTRO BRINDIS | Fecha: 2021-08-23 04:33:20 | Firmante
 gHXVY5FeBfPc7HeH2D SUp0C XOCJKT5 FafZA1aqlow WInGEEZ07 oJqNQ8GDnMDQ7xNs SWxHxklo6hD/bStRH SrxJx1gDjfkW15/1exumiiCp Wbhp1A/wm20Fqj0q31wXvJ M1xQV48 YPwC YW5QORrPSK+7 LmhDEQ9VxVXCJBaK4q9nTh Sd7nP7V9MLxq+ xLLp5W6o KCID6okj35vVH90aNRi+KVlvQ90Cbe0edVSDCs8q6b7UjL AVGzIR6xhTeZ BAv5CU9niW1 oepYzPa1wmvgX8nb9a73iMg2TgYqS1vGmI/G8zP+uNq5w1C5CYAMhaFr3rQw==

ROSENDO BALOIS MORALES | Fecha: 2021-08-23 09:57:08 | Firmante
 H4pAA5F5zQu0fyI9 I6N8KKScNAfMvAJrSICAqsdWKLkKTAjQbHyK46D umSpz8jPG+8WIF0WP8Mmp5l9gzHnjpxXWVxT+PWesVkod1wfw5uLhKSGBwAX8hmVwWm3hwn8 6CmJazEbisVqhdw6w972+Hd0+OvrgKdSTIY4DBud8v7C2i6vh7ks9Md G1L RnxTr2zAD BML2F1JKH Jq36gOxSFzTw1Ubikq3kDR1003hD089cmf2zyH70qMlsVRMhcbzL1 AfsSgsYvb89eqzL TJPTM J6j9krrxG9gbRwJ+8H9W14syYB1uouuJRWJk/SmChg9MM8Y3Ddyw==

EDUARDO SALCEDO PÉREZ | Fecha: 2021-08-23 20:19:09 | Firmante
 bspZUNgyE+wi6x1IRY19s35eR3mY5bp1MbT63g88YT31fJABxw+KodW oosgvKJ6K350GrUw8WYf1p8h9j+cS5rFdkw5cXqWBR11sPGDcQRHeJDp3cho5D OwwloWlaSESt rK5PwDUSUk3fKQz09uSkdbIT4BK350 sv3dEWHL6QFN4wBpF67V/elgJIB6E+U Gczm9WG80 BzSpIvY82Oko8w7VC GHWA29pSpXYUvJVMKmiZ00lvs0ykZ6zODuJSj5Y7q 2Hl+lp6HWE311hyexMqdyGYBENNbt7v99PMxUVFYw4 1RiY4KNChQA5vSE+RGHx6Dw==

VICTOR LOPEZ MARTINEZ | Fecha: 2021-08-25 14:16:24 | Firmante
 b0S1asLT5wVVRuH00rTD YwCwe0z4k6L opUpiAcCR ELidSa09v73W SgBph9w3HLD8SFTido Q0HKgQWEGl4gTDyOY+AUHLT6PTV2e9AO/AensEVzj+S7aAvC18BEVYdrjMcRr SIMBBGw+CrFIZIU2QeVW52L/X4U26c0C/yMmSuVJivWVf0fWpRy6Vd8lotd oXy72x0UE4/R3ExohbmfBzofTZ44GE7rRw77Bh2g9rekR5Ly08SKCa05ekxNRWf7J+Luif 2TkiqVOMXyFNP8h87XNhtpvdSYDasJXpEILAr5C47k+9UWHLqSkP9Dmg==



Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

RD/r9y

<https://efirma.uaem.mx/noRespuIdo/X/Ekr77K9Ombgp hzZcAHR aRZC 1B0Y>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para mis estudios de posgrado, con lo cual me permitió realizar este proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación académica.

A los Dres. Porfirio Juárez López y José Anzaldo Hernández por darme la oportunidad de participar en esta investigación científica, por los conocimientos compartidos y el apoyo brindado durante todo el transcurso del estudio de Doctorado.

A mis sinodales, Dr. Irán Alía Tejacal, Dr. Víctor López Martínez, †Dr. Dagoberto Guillén Sánchez, Dr. Rogelio Castro Brindis, Dr. Rosendo Balois Morales y Dr. Eduardo Salcedo Pérez por las observaciones y acertadas correcciones para la mejora de este trabajo de investigación, asimismo, por la contribución de mi formación académica.

ÍNDICE GENERAL

	Página
Índice de cuadros.....	x
Índice de figuras.....	xii
Introducción general.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis general.....	4
Hipótesis específicos.....	4
CAPÍTULO I.....	5
Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas.....	5
Resumen.....	5
Criterios empleados en la búsqueda de información.....	7
Técnicas para producir biocarbón.....	7
Biocarbón en el crecimiento y productividad de cultivos.....	9
Investigaciones de biocarbón en México.....	13
Costos de producción del biocarbón.....	14
Tendencias y perspectivas de investigación.....	16
Conclusiones.....	17
Literatura citada.....	18
CAPÍTULO II.....	24
Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos.....	24

Resumen.....	24
Summary.....	25
Introducción.....	25
Materiales y métodos.....	28
Material vegetal, tratamientos y elaboración de biocarbón.....	28
Rendimiento de biocarbón.....	29
Concentración nutrimental.....	29
Estructura de biocarbones.....	30
Diseño experimental y análisis estadístico.....	30
Resultados y discusión.....	30
Rendimiento de biocarbón.....	30
Concentración total de nutrimentos.....	32
pH y conductividad eléctrica.....	33
Concentración extraíble de nutrimentos.....	35
Estructura del biocarbón.....	36
Conclusiones.....	39
Literatura citada.....	39
CAPÍTULO III.....	44
Biocarbones de cascarilla de arroz y ápices de caña de azúcar en el crecimiento de lechuga orejona (<i>Lactuca sativa</i> var. <i>longifolia</i>).....	44
Resumen.....	44
Summary.....	45
Introducción.....	45
Materiales y métodos.....	47

Establecimiento del experimento y elaboración de biocarbones.....	47
Tratamientos.....	47
Variables evaluadas.....	49
Concentración nutrimental foliar.....	49
Diseño experimental y análisis estadístico.....	49
Resultados.....	50
Primer experimento.....	50
Crecimiento de plantas.....	50
Concentración nutrimental foliar.....	52
Análisis de correlación.....	53
Segundo experimento.....	54
Crecimiento de plantas.....	54
Concentración nutrimental foliar.....	55
Análisis de correlación.....	56
Discusión.....	57
Crecimiento de plantas de lechuga orejona.....	57
Concentración nutrimental foliar.....	59
Conclusiones.....	60
Literatura citada.....	61
CAPÍTULO IV.....	65
Biocarbón de ápices de caña de azúcar en el crecimiento de albahaca tailandesa (<i>Ocimum basilicum</i> var. <i>Thyrsiflora</i> L.) cultivada en invernadero..	65
Resumen.....	65
Summary.....	65

Introducción.....	66
Materiales y métodos.....	68
Tratamientos.....	68
Siembra y trasplante.....	69
Variables de crecimiento.....	70
Concentración nutrimental foliar.....	70
Diseño experimental y análisis estadístico.....	70
Resultados y discusión.....	70
Crecimiento de albahaca tailandesa.....	70
Concentración nutrimental foliar.....	73
Conclusiones.....	74
Literatura citada.....	75
CAPITULO V.....	78
Biocarbón de cascarilla de arroz como sustrato en el crecimiento de plántulas de pepino.....	78
Resumen.....	78
Summary.....	79
Introducción.....	79
Materiales y métodos.....	81
Elaboración de biocarbón.....	81
Tratamientos.....	81
Caracterización física.....	81
Concentración nutrimental.....	82
Crecimiento de plántulas.....	82

Diseño experimental y análisis estadístico.....	83
Resultados y discusión.....	83
Propiedades físicas.....	83
Concentración nutrimental.....	87
Crecimiento de plántulas.....	88
Análisis de correlación.....	90
Conclusiones.....	92
Literatura citada.....	92
CAPÍTULO VI.....	98
Conclusiones generales.....	98
Apéndice.....	99

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
CAPITULO I.....	5
Cuadro 1. Rendimiento de producto final a partir de diferentes tecnologías termoquímicas para elaborar biocarbón.....	9
Cuadro 2. Dosis de aplicación de biocarbón y beneficios agronómicos en varios cultivos agrícolas.....	11
CAPITULO II.....	24
Cuadro 1. Rendimiento, concentración total de macronutrientes y de sodio (Na) en biocarbón de ápices de caña de azúcar con tres catalizadores.....	31
Cuadro 2. pH, CE y concentración nutrimental extraíble en biocarbón de ápices de caña de azúcar con tres catalizadores.....	34
CAPITULO III.....	44
Cuadro 1. Concentración nutrimental del suelo, biocarbón de cascarilla de arroz (BCA) y biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA).....	48
Cuadro 2. Longitud de hoja, peso de biomasa seca, área foliar y SPAD de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz (BCA) a los 74 días después del trasplante.....	50
Cuadro 3. Concentración nutrimental foliar de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz (BCA).....	52
Cuadro 4. Matriz de correlación (Pearson) entre las variables de crecimiento y concentración nutrimental foliar de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz.....	53
Cuadro 5. Longitud de hoja, peso de biomasa seca, área foliar, SPAD de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) a los 74 días después de trasplante.....	54

Cuadro 6. Concentración nutrimental foliar de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA)..	56
Cuadro 7. Matriz de correlación (Pearson) entre las variables de crecimiento y concentración nutrimental foliar de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar...	57
CAPITULO IV.....	65
Cuadro 1. Descripción de los tratamientos mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) con suelo.....	69
Cuadro 2. Concentración nutrimental extraíble y N total del suelo y biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA).....	69
Cuadro 3. Altura, peso de biomasa seca, área foliar y SPAD de albahaca tailandesa cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) a los 33 días después de trasplante.....	71
Cuadro 4. Concentración nutrimental foliar de albahaca tailandesa cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA)..	74
CAPITULO V.....	78
Cuadro 1. Distribución granulométrica (porcentual con base a peso) en mezclas de turba (T) y biocarbón de cascarilla de arroz (BC).....	84
Cuadro 2. Propiedades físicas de la turba (T), el biocarbón de cascarilla de arroz (BC) y mezclas de ambos.....	86
Cuadro 3. Concentración nutrimental de la turba y el biocarbón de cascarilla de arroz.....	87
Cuadro 4. Efecto de la turba y biocarbón de cascarilla de arroz en el crecimiento de plántulas de pepino.....	89
Cuadro 5. Correlaciones de Pearson entre propiedades físicas y variables de crecimiento de plántulas de pepino.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPITULO I.....	5
Figura 1. Diagrama del proceso de carbonización en seco (pirólisis).....	8
CAPITULO II.....	24
Figura 1. a) Biomasa de ápices de caña de azúcar. b) Biocarbón de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica.....	29
Figura 2. Microesferas en el biocarbón de ápices de caña de azúcar con tres catalizadores.....	38
CAPITULO III.....	44
Figura 1. Peso de biomasa fresca de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz (BCA) a los 74 días después de trasplante.....	51
Figura 2. Peso de biomasa fresca de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) a los 74 días después de trasplante.....	55
CAPITULO IV.....	65
Figura 1. Peso de biomasa fresca de albahaca tailandesa cultivada en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) a los 33 días después de trasplante.....	72

BIOCARBÓN DE CASCARILLA DE ARROZ Y ÁPICES DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL CRECIMIENTO DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.), ALBAHACA (*Ocimum basilicum* L.) Y PEPINO (*Cucumis sativus* L.)

INTRODUCCIÓN GENERAL

El calentamiento global, la escasez de agua y la disminución del carbono orgánico del suelo son los grandes problemas que enfrenta el mundo (Escalante-Rebolledo *et al.* 2016); aunado a la urbanización y otras actividades, ha traído consigo que los recursos edáficos para la agricultura sean limitados y esto incrementa la demanda de alimentos (Escalante-Rebolledo, 2013). La adición de carbono orgánico a los suelos agrícolas puede mejorar la fertilidad de éstos, y así aumentar la producción de cultivos (Escalante-Rebolledo *et al.* 2016). Esta práctica también secuestra permanentemente el carbono lo que reduciría los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera (Laghari *et al.*, 2016).

Dentro de las propuestas en el sector agrícola, se busca que la agricultura sea más amigable con el medio ambiente, utilizando alternativas para el mejoramiento de los suelos, los cuales debido a su uso intensivo se han degradado y perdiendo fertilidad, dentro de éstas son las prácticas que se realizan para mejorar la fertilidad del suelo entre ellas está la incorporación de compostas, residuos de cosechas, pajas, cascarillas y biocarbones (Velázquez, 2016; Rodríguez, 2007).

El biocarbón es un carbón vegetal producido a altas temperaturas utilizando residuos de cosechas, pajas, cascarillas o cualquier tipo de material vegetal, por medio de técnicas como pirolisis o carbonización hidrotérmica (*HTC*, por sus siglas en inglés), estas técnicas influyen en las propiedades químicas del biocarbón (Kambo y Dutta 2015, Falco *et al.* 2011). Lynam *et al.* (2011, 2012) sugieren que el uso de ácidos o sales como catalizadores durante el proceso de HTC, puede ayudar a que el proceso de hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa sean más eficientes; por lo tanto, esto influye en el rendimiento.

Las propiedades del biocarbón dependen de la materia prima utilizada y las condiciones de pirolisis (Blok *et al.*, 2017). La biomasa, en varias formas, ha sido incorporada al suelo para aumentar el carbono orgánico y el humus del suelo para mejorar la fertilidad del suelo para una agricultura sostenible desde hace mucho tiempo (Lehmann *et al.*, 2006). Hasta cierto punto, es indiscutible que la pirolisis de la biomasa y la aplicación posterior del biocarbón como secuestrador de carbono en el suelo tiene más ventajas en comparación con la práctica agrícola normal de incorporación directa, que resulta en inmediata y rápida mineralización, pero con liberación de CO₂, lo cual no es ecológicamente sustentable (George *et al.*, 2017).

El uso de biocarbón ha demostrado aumento en el rendimiento de varios cultivos (Rosenani *et al.*, 2014), incrementando la longitud de raíz, la altura de la planta y la fertilidad del suelo (Schulz *et al.*, 2013). Estos funcionan como agentes secuestrantes del carbono presente en la atmósfera, lo que puede contribuir a la mitigación del cambio climático (Rosenani *et al.*, 2014).

Existen estudios que han reportado respuestas favorables con el uso del biocarbón en diferentes cultivos, al respecto, Varela *et al.* (2013) reportaron que el biocarbón de cascarilla de arroz adicionado al suelo incrementó el peso fresco de la planta, en un intervalo de 217 % a 284 % en espinaca de agua (*Ipomoea aquatica* Forssk.). La incorporación de biocarbón de cascarilla de arroz en los cultivos de *Amaranthus viridis* L. e *Ipomoea reptans*, aumentó el rendimiento de los mismos en 158 % y 259 % respectivamente (Rosenani *et al.*, 2014). Elad *et al.* (2010) reportaron que la respuesta en la mejora de la cosecha, observada como resultado de la utilización del biocarbón como enmienda al suelo puede atribuirse al contenido nutrientes que se encuentran presentes en el biocarbón y otros factores, como una mayor retención de nutrientes, mejoramiento del pH, una capacidad creciente del intercambio catiónico y la neutralización de compuestos fitotóxicos presentes en el suelo además de mejoras en las características físicas del mismo.

En otra investigación por Lehmann *et al.* (2003) indican que el Biocarbón puede adicionar de forma directa al suelo, diferentes nutrientes como el K, P y Ca, además puede evitar que estos y otros nutrientes presentes en el suelo se pierdan por lixiviación. Los usos del biocarbón son múltiples (Schmidt y Wilson, 2014) y la aplicación de éste al suelo ya constituye una práctica común (Lehmann y Joseph, 2009; Verheijen *et al.*, 2009). Varios investigadores (Chan *et al.*, 2007; Lehmann y Joseph, 2009; Steiner, 2010) reportan que su empleo podría conducir a una mayor producción de los cultivos y mejoramiento de la calidad del suelo, de ahí el interés en esta práctica. Por su parte, Kloss *et al.* (2012), Mukherjee y Lal (2014) mencionan que el uso del biocarbón debe de estudiarse más detalladamente debido a que las características químicas del biocarbón cambian de acuerdo con el material con el que este es elaborado, la técnica utilizada para elaborarlo, además el tipo de suelo donde será incorporado también influye en el comportamiento del biocarbón y por ende en el cultivo a establecer. Sin embargo, existen escasos estudios en relación con el uso de biocarbón de cascarilla de arroz y ápices de caña de azúcar en cultivos de importancia económica ya que esta técnica es relativamente nueva en México, es por ello por lo que es necesario generar información básica y aplicada acerca del efecto del biocarbón en el crecimiento y rendimiento de hortalizas y plantas aromáticas.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de biocarbones de cascarilla de arroz y ápices de caña de azúcar en el crecimiento de lechuga, albahaca y pepino.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Producir y cuantificar el rendimiento de conversión de biocarbón de ápices de caña de azúcar mediante la técnica de carbonización hidrotérmica más la adición de catalizadores orgánicos.
- 2) Caracterizar químicamente los biocarbones de cascarilla de arroz y ápices de caña de azúcar.

- 3) Evaluar el efecto de los biocarbones de cascarilla arroz y ápices de caña de azúcar en el crecimiento de lechuga orejona.
- 4) Evaluar el efecto del biocarbón de ápices de caña de azúcar en el crecimiento de albahaca tailandesa.
- 5) Evaluar el efecto del biocarbón de cascarilla de arroz y en la producción de plántulas de pepino.

HIPÓTESIS GENERAL

Los biocarbones de cascarilla de arroz y ápices de caña de azúcar favorecerán en el crecimiento de lechuga, albahaca y pepino.

HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- 1) El biocarbón de ápices de caña de azúcar presentará mayor rendimiento de conversión con la adición de ácido propiónico en comparación con los ácidos cítrico y maleico.
- 2) El biocarbón de cascarilla de arroz presentará mejores características químicas en comparación con el biocarbón de ápices de caña de azúcar.
- 3) Los biocarbones de cascarilla de arroz y ápices de caña a 21 % favorecerá el crecimiento de lechuga orejona.
- 4) El biocarbón de ápices de caña de azúcar al 28% favorecerá el crecimiento de albahaca tailandesa.
- 5) El biocarbón de cascarilla de arroz al 40% favorecerá el crecimiento de plántulas de pepino.

CAPÍTULO I

Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas **Potential benefits of biochar in the productivity of agricultural crops**

Resumen

El biocarbón, llamado en inglés *biochar*, es un material poroso sólido rico en carbono que se obtiene por la conversión termoquímica de la biomasa y de materiales orgánicos de origen agrícola o forestal en un ambiente limitado o carente de oxígeno. En el presente artículo de revisión se plantearon dos objetivos: 1) proporcionar una reseña de las técnicas de producción de biocarbón, y 2) realizar una revisión sobre el efecto del biocarbón en el crecimiento y la productividad de cultivos. Se incluyen las investigaciones de biocarbón en la agricultura realizadas en México, costos de producción, así como las tendencias y perspectivas de investigación. La búsqueda de los artículos científicos del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas publicados en el periodo de enero de 2011 a diciembre de 2020 se realizó a través de las bases de datos Web of Science, Dialnet, Redalyc y Scielo. Esta revisión muestra que en los últimos 10 años existe un incremento de investigaciones en el uso de biocarbón en la agricultura, debido a que la mayoría de las investigaciones han reportado efectos positivos en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, asimismo, es necesario incrementar las investigaciones de biocarbón elaborado con biomasa vegetal y materiales orgánicos de disponibilidad local. La mayoría de los estudios de biocarbón se han realizado en cereales y algunas hortalizas, por lo que es necesario realizar investigaciones del efecto del biocarbón en plantas ornamentales, así como en hierbas aromáticas y en plantas medicinales.

Palabras clave: *biochar*, carbonización hidrotérmica, mejorador de suelos, pirólisis, rendimiento de cultivos.

El biocarbón es un material sólido rico en carbono que se obtiene por la conversión termoquímica de materiales orgánicos en un ambiente limitado o carente de oxígeno (Zheng *et al.*, 2016; Guo, 2020), el cual tiene propiedades físicas y químicas aptas para

el almacenamiento de carbono a largo plazo en un medio natural y, potencialmente, mejora de la fertilidad de los suelos (Ibarrola *et al.* 2013).

El biocarbón es el resultado de la carbonización de materias primas como: residuos de cosecha, biomasa de árboles, desechos de papel, cascarilla de arroz, entre otros (Escalante-Rebolledo *et al.* 2016; Adeyemi y Idowu, 2017;). Se puede obtener biocarbón de casi cualquier material orgánico, pero es apropiada la de origen vegetal, sobre todo la constituida por materiales lignocelulósicos, después del agua, son los constituyentes predominantes de la vegetación terrestre (Quesada-Kimzey, 2012). La distinción entre el biocarbón y otros productos ricos en carbono (carbón y carbón activado), el primero se aplica al suelo con el propósito del secuestro de carbono (Steiner, 2016). Es decir, las plantas en un ambiente natural se descomponen y el carbono se libera al medio ambiente, lo que incrementa la concentración de CO₂; sin embargo, el CO₂ puede reducirse al convertir la biomasa vegetal en biocarbón, ya que el carbono queda incorporado en el mismo.

La producción de biocarbón tiene cuatro objetivos principales (Ibarrola *et al.* 2013): 1) mejoramiento del suelo, 2) aprovechamiento de residuos, 3) mitigación del cambio climático y 4) producción de energía. El mejoramiento se produce al adicionar el biocarbón al suelo, lo que favorece la retención de agua y nutrientes, además, aumenta la actividad microbiana, el segundo objetivo se cumple, al reducir los desechos de la agricultura y otras industrias, y darles valor agregado, el tercer objetivo del biocarbón es mitigar el cambio climático mediante el secuestro el carbono de la biomasa y reducción de gases de efecto invernadero (GEI), ya que esta tecnología reduce la liberación de los GEI al almacenarlas en forma de carbono estable en el suelo y por último, se puede producir energía renovable.

En los últimos años se han incrementado las investigaciones acerca de la producción y aprovechamiento del biocarbón (Verheijen *et al.* 2014, Jirka y Tomlinson, 2014) por lo que esta revisión concentra la información de los beneficios potenciales del biocarbón en la agricultura. Se plantearon dos objetivos: 1) proporcionar una reseña

de las técnicas de producción de biocarbón, y 2) realizar una revisión acerca del efecto del biocarbón en el crecimiento y productividad de cultivos. Se incluyen las investigaciones de biocarbón en la agricultura realizadas en México, costos de producción, así como las tendencias y perspectivas de investigación.

Criterios empleados en la búsqueda de información

La búsqueda de artículos en inglés se efectuó en la base de datos de Web of Science, Dialnet, Redalyc y Scielo para los artículos en español, publicados de enero de 2011 a diciembre de 2020. Se consideraron las siguientes palabras en inglés *biochar, importance of biochar, biochar and soil, biochar and yield of crops, biochar in agriculture, biochar in horticulture*, y en español: biocarbón, importancia del biocarbón, biocarbón y suelo, biocarbón y rendimiento de cultivos, biocarbón en agricultura, biocarbón en la horticultura. De esta búsqueda, tanto en inglés como en español se obtuvieron 34,577 artículos, después, se descartaron los artículos que se enfocaban en temas de termodinámica, compuestos químicos estructurales del biocarbón y microbiología de suelos, lo que redujo el número de artículos a 5,461. Finalmente, se seleccionaron 46 artículos enfocados en la aplicación del biocarbón con fines de incrementar la productividad de cultivos agrícolas.

Técnicas para producir biocarbón

Existen varias tecnologías termoquímicas para la producción de biocarbón: pirólisis (lenta, rápida, y ultrarrápida), gasificación y carbonización hidrotérmica (*HTC*; por sus siglas en inglés) (Zheng *et al.* 2016; Adeyemi y Idowu, 2017). De acuerdo con Quesada-Kimsey (2012), las técnicas de pirólisis y gasificación, requieren que el material (biomasa o residuos) sea secada previo al proceso de carbonización, sin embargo, esta etapa se puede omitir con la técnica de carbonización hidrotérmica (Figura 1), la cual representa una ventaja ya que el proceso se realiza en un medio acuoso y la humedad de la biomasa no afecta la elaboración del biocarbón, por lo que esta técnica permite el aprovechamiento de residuos con alto contenido de agua o residuos de cosechas recién cortados.

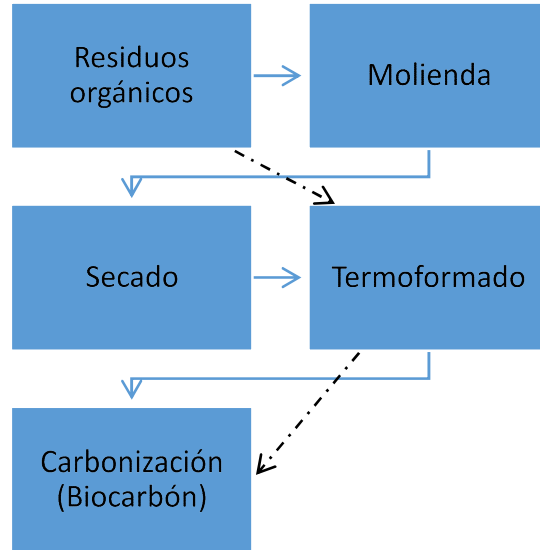


Figura 1. Diagrama del proceso de carbonización en seco (pirólisis). Las flechas con líneas discontinuas indican el proceso de la carbonización hidrotérmica (*HTC*). Adaptado de Quesada-Kimsey (2012).

Con las técnicas termoquímicas mencionadas se producen tres productos principales: sólido (biocarbón), líquido (bioaceite) y gas de síntesis (*syngas*) (Cuadro 1). En general, la pirólisis lenta produce más *syngas* y biocarbón, la pirólisis rápida tiende a producir más aceites y líquidos, mientras que los sistemas de gasificación producen cantidades grandes de *syngas* y poco biocarbón; en contraste, la carbonización hidrotérmica produce más biocarbón y poco *syngas*.

Cuadro 1. Rendimiento de producto final a partir de diferentes tecnologías termoquímicas para elaborar biocarbón (Ibarrola *et al.*, 2013; Kambo y Dutta, 2015).

Técnica	Temperatura y duración	Sólido (biocarbón, %)	Líquido (bioaceite, %)	Gas (<i>syngas</i> , %)
Pirólisis lenta	~500 °C, días	35	30	35
Pirólisis rápida	~500 °C, segundos	12	75	13
HTC	180-260, horas	70	25	5
Gasificación	>800 °C, horas	10	5	85

HTC, por sus siglas en inglés: carbonización hidrotérmica.

Investigaciones recientes han propuesto el uso de biomasa o residuos de la agroindustria (estiércol animal, paja de trigo, entre otros) como materias primas para la inmovilización, extracción o recuperación de nutrientes tales como N, P y K mediante el proceso de carbonización hidrotérmica (*HTC*) (Ekpo *et al.*, 2016; Melo *et al.* 2016; Adeyemi y Idowu, 2017). La técnica de *HTC* es un proceso que emplea medios acuosos y temperaturas moderadas (150-350 °C), que produce un material sólido llamado hidrochar (Kruse *et al.* 2013; Arteaga-Pérez *et al.* 2015).

Biocarbón en el crecimiento y productividad de cultivos

La interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas determinan la fertilidad del suelo, las cuales pueden ser modificadas positivamente con la adición de biocarbón y puede favorecer el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Silva *et al.* (2017) evaluaron tres biocarbones en dosis de 0, 2.5, 5.0, 7.5 y 10.0 % v/v en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*), y encontraron que, independientemente del biocarbón usado, estos promovieron mayor desarrollo de la planta de frijol con un aumento en la masa seca de raíz y tallo, el número de vainas, el número y la masa seca de los granos, en comparación con el tratamiento control. En general, las dosis del 10, 7 y 7 % de biocarbón de cascarilla de arroz, aserrín y sorgo ensilado, respectivamente, generaron el mayor número de vainas, número de granos y, en consecuencia, mayor producción de materia seca en grano de frijol.

Xu *et al.* (2015) probaron un biocarbón a partir de cáscara de cacahuate en suelo tipo ferrosol en el cultivo de cacahuate y reportaron que la aplicación del biocarbón a dosis de 9.2 t ha^{-1} mejoró la calidad comercial del grano (calidad jumbo). Pérez-Salas *et al.* (2013) aplicaron biocarbón de madera de melina (*Gmelina arborea*) en banano (*Musa AAA*) y reportaron un incremento de 104 % en altura de planta en comparación con el testigo, a los 101 días después del trasplante.

Alburquerque-Méndez *et al.* (2013) reportaron que al aplicar biocarbón de astilla de pino y restos de poda de olivo no observaron diferencias estadísticas en el crecimiento de girasol, lo cual pudo ser debido a la propia naturaleza de ese tipo biocarbón, por ser rico en carbono pero relativamente pobre en nutrientes; asimismo, mencionan que el biocarbón puede mejorar las características físicas del suelo y que no tiene efectos negativos sobre el crecimiento del girasol, por lo que puede ser utilizado como reservorio de carbono en suelos agrícolas y forestales. En contraste, se han reportado efectos negativos del biocarbón aplicado al suelo, es decir, cambios desfavorables en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, que pueden originar reducción en el crecimiento y rendimiento en algunos cultivos.

Lo anterior puede deberse a que la mayoría de las investigaciones se realizan a corto plazo (Mukherjee y Lal, 2014), por lo que sería necesario hacer investigaciones a mediano y largo plazo, así como en varios ciclos de cultivo (Carter *et al.* 2013). En este sentido, Guo (2020) indica que para maximizar los beneficios de la aplicación de biocarbón como mejorador de suelos y que eventualmente favorezca el crecimiento y rendimiento de cultivos agrícolas, es importante considerar tres aspectos: la fuente o material orgánico con que se produjo el biocarbón, la dosis de aplicación, y el tipo de suelo. En el Cuadro 2 se presentan dosis de aplicación de biocarbón y su efecto agronómico en varios cultivos.

Cuadro 2. Dosis de aplicación de biocarbón y beneficios agronómicos en varios cultivos agrícolas.

Materia prima	Técnica	Temperatura (°C)	Dosis de aplicación de biocarbón	Cultivo	Beneficio agronómico (incremento respecto al tratamiento testigo sin aplicación de biocarbón)	Referencia
Paja de maíz	Pirólisis	450	5 %	Soya (<i>Glycine max</i> L.)	4.8 % en altura de planta y 8 % en peso de biomasa seca.	Liu <i>et al.</i> (2020)
Brotos de vid	Pirólisis	400	3 %	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	52 % en peso seco de la raíz	Videgain-Marco <i>et al.</i> (2020)
Residuos de uva	Pirólisis	300	2 %	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	255 % en peso de materia seca.	Manolikaki y Diamadapoulus (2019)
Varias especies	Pirólisis	200-450	16 t ha ⁻¹	Soya (<i>Glycine max</i> L.)	25.5 % en peso de materia seca.	Petter <i>et al.</i> (2019)
Paja de trigo	Pirólisis	300	7 %	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	344 % en peso de materia seca.	Iftikhar <i>et al.</i> (2018)
Paja de trigo	Pirólisis	350-500	50 t ha ⁻¹	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> Mill.)	96 % y 106.5 % en rendimiento (t ha ⁻¹) en primero y segundo ciclo, respectivamente.	Agbna <i>et al.</i> (2017)
Viruta de madera	Gasificación	670	20 %	Gerbera (<i>Gerbera jasmesonii</i>)	16.67 % en peso de materia fresca.	Blok <i>et al.</i> (2017)
Paja de maíz	Pirólisis	700	20 t ha ⁻¹ (0.7 %)	Soya (<i>Glycine max</i> L.)	16.6 % en peso de materia seca.	Scheifele <i>et al.</i> (2017)
Paja de maíz	HTC	200	20 t ha ⁻¹ (0.7 %)	Soya (<i>Glycine max</i> L.)	13.2 % en peso de materia seca.	
Lodo de agua residual	Pirólisis	450-650	40 t ha ⁻¹	Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i> L.)	466 % en peso de materia seca.	Silva <i>et al.</i> (2017)
Aserrín de pino	Pirólisis	700	5 % (105 t ha ⁻¹)	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	26 % en altura de planta y 32 % en rendimiento (materia seca por planta).	Laghari <i>et al.</i> (2016)
Aserrín de pino	Pirólisis	400	1 % (22 t ha ⁻¹)	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	24 % en altura de planta y 22 % en rendimiento	Laghari <i>et al.</i> (2015)

					(materia seca por maceta)	
Paja de trigo	Pirólisis	525	3 % (90 t ha ⁻¹)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	8.3 % en peso de materia seca.	Kloss <i>et al.</i> (2014)
Poda de viñedo	Pirólisis	400	3 % (90 t ha ⁻¹)	Trébol rojo (<i>Trifolium pratense</i> L.)	18 % en peso de materia seca.	
Poda de olivo	Pirólisis	449	1 %	Girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	31 % en peso de materia seca.	Albuquerque <i>et al.</i> (2014)
Residuos de madera de abeto	HTC	180	4 %	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	15.4 % en el rendimiento (peso de materia seca por maceta) en el segundo ciclo.	Bargmann <i>et al.</i> (2014a)
Hojuelas de remolacha	HTC	190	4 %	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	46.3 % en peso de materia seca.	
Hojuelas de remolacha	HTC	190	4 %	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	147 % en peso de materia seca.	Bargmann <i>et al.</i> (2014b)
Hojuelas de remolacha	HTC	190	2 %	Puerro (<i>Allium ampeloprasum</i>)	61.3 % en peso de materia seca.	
Cascarilla de arroz	Gasificación	900-1100	50 g kg ⁻¹	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	903 % en peso de materia fresca.	Carter <i>et al.</i> (2013)
Residuos de codorniz	Pirólisis	500	98.4 g por maceta	Soya (<i>Glycine max</i> L.)	229.4 % en peso de materia seca.	Suppadit <i>et al.</i> (2012)
Estiércol de vaca	Pirólisis	500	15 t ha ⁻¹	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	150 % en el rendimiento de grano y 64.6 % en altura de planta.	Uzoma <i>et al.</i> (2011)

HTC, por sus siglas en inglés: carbonización hidrotérmica.

Como se puede observar en el Cuadro 2, la mayoría de las investigaciones se han realizado en cultivos de cereales y algunas hortalizas, sin embargo, hace falta investigar el efecto del biocarbón en el crecimiento de plantas ornamentales, aromáticas y medicinales, sobre todo por la importancia económica y social de esos

cultivos hortícolas. Recientemente, el biocarbón además de utilizarse como mejorador de suelo, también se utiliza en la producción de cultivos en contenedor y en invernadero.

En este sentido, el biocarbón se emplea en mezcla con sustratos comerciales como turba (*peat moss*), perlita, fibra de coco, vermiculita, entre otros, para mejorar sus propiedades físicas y químicas (Blok *et al.* 2017; Huang y Gu, 2019). Por ejemplo, Guo *et al.* (2018) proponen que el biocarbón puede ser utilizado hasta en 80 % mezclado con el sustrato Shunshine® Mix # 1 en la producción de nochebuena en invernadero, sin afectar la calidad visual de la planta ni el índice de crecimiento. Estos mismos autores concluyeron que las plantas de nochebuena cultivadas con 20 % de biocarbón mostraron mayor crecimiento (8.3 %) que el tratamiento testigo sin biocarbón. Por otra parte, Blok *et al.* (2017) reportaron que el biocarbón a base de madera, y residuos de tomate y pimiento dulce, puede sustituir en 20 y 10 % con base a volumen a la turba comercial sin afectar el crecimiento de crisantemo y gerbera cultivados en maceta, respectivamente. Estos resultados plantean la posibilidad de que el biocarbón puede ser empleado en mezclas de sustratos orgánicos con la finalidad de reemplazar parcialmente el uso de turba comercial (*peat moss*) no renovable, lo que permitiría reducir costos de producción y un manejo agronómico más sustentable.

Investigaciones de biocarbón en México

En función de los artículos publicados en revistas indizadas en los últimos 10 años, en México las investigaciones de biocarbón con fines agrícolas son escasas. A continuación se describen brevemente las investigaciones que se han realizado: Orozco-Gutiérrez y Lira-Fuentes (2020) evaluaron cinco temperaturas (350, 450, 550, 650 y 750 °C) en la elaboración de biocarbón de bambú producido mediante pirólisis lenta y obtuvieron que la mejor temperatura para la producción de biocarbón de bambú fue a 550 °C con rendimiento de conversión de 27 %, además, con ese tratamiento se presentaron los mayores valores en las propiedades físicoquímicas con 11.2 % de volátiles, 8.1 % de cenizas, y 72 % de carbón. Velázquez-Maldonado *et al.* (2019)

reportaron que para la elaboración de biocarbón de cascarilla de arroz, la adición de los ácidos maleico y cítrico al 10 % como catalizadores, generan el mayor rendimiento de conversión (66 %). Los mismos autores indicaron que los tres macronutrientes con mayor concentración fueron Ca, N y K, mientras que para micronutrientes los de mayor concentración fueron Fe y Mn, así como el elemento Na. Velázquez-Machuca *et al.* (2019) evaluaron el uso potencial del biocarbón de lodos residuales obtenidos de una planta de tratamiento de aguas residuales de Morelia, Michoacán, como mejorador de suelos agrícolas al considerar como indicadores las propiedades físicas y químicas del material, así como el contenido de nutrientes y su concentración baja de metales tóxicos. Esta investigación concluye que el biocarbón elaborado puede utilizarse como mejorador de suelos agrícolas por su alto contenido de nutrientes y posee bajo riesgo ambiental debido a su bajo contenido de metales tóxicos.

Por su parte, Medina y Medina (2018) construyeron y evaluaron el desempeño en condiciones de campo, de un prototipo de biocarbón-pirólisis autotérmico y móvil, con volumen útil de 1.7 m³ de biomasa triturada. En el equipo mencionado anteriormente, el cual tenía capacidad para procesar entre 300 y 400 kg de biomasa por día, elaboraron biocarbón de residuos de poda de aguacate, con un rendimiento de 16 % en biocarbón. Por su parte, Concilco-Alberto *et al.* (2018) al evaluar un biocarbón comercial de bambú en el crecimiento y rendimiento de avena forrajera, reportaron que el mejor tratamiento fue 25 t ha⁻¹ de biocarbón con fertilización convencional NPK (120-60-00), ya que incrementa 34 % la altura de planta y en 103 % la materia fresca en comparación al tratamiento testigo. Escalante-Rebolledo *et al.* (2016) hizo una revisión acerca de la naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo del biocarbón. Como se puede apreciar, en México existe un interés creciente en el uso de biocarbón, pero hacen falta más investigaciones para fortalecer el aprovechamiento del biocarbón en sistemas de producción agrícola.

Costos de producción del biocarbón

La información detallada de los costos de producción de biocarbón es limitada, sin embargo, existen algunas investigaciones donde han realizado estimaciones

tecnológicas y económicas. En México, Medina y Medina (2018) construyeron un equipo móvil de pirólisis lenta fabricado en acero inoxidable para la elaboración de biocarbón de residuos de aguacate, con un costo estimado de USD \$ 32,500.00 con capacidad de 1.7 m³ de volumen útil, equivalente entre 300 a 400 kg de madera, la cual está en función del tamaño y humedad de la astilla. La vida útil del equipo se considera de 7 años, con uso intensivo de 19 h diarias durante los 365 días del año, y 23 años con uso moderado de 8 h diarias durante el mismo lapso. Sin embargo, la recuperación de la inversión estará en función del análisis económico. Estos autores mencionan que el equipo fabricado presenta costos competitivos respecto a equipos producidos en otros países, por ejemplo, equipos de fabricación norteamericana con capacidad de transformación de 200 kg de biomasa por carga, cuestan USD \$ 350,000.00 más un costo adicional de USD \$ 25,000.00 por concepto de capacitación.

Por otro lado, Ibarrola *et al.* (2013) reportan que la industria azucarera podría invertir en hornos tipo Adam Retort con capacidad de producción de 100 a 400 t por año y estimaron costos de producción entre USD \$ 10.00 y \$ 100.00 por tonelada de biocarbón, asimismo, atribuyeron esta variación de costos a la capacidad de producción de los ingenios, de la tecnología disponible para separar y recolectar el biocarbón. Los mismos autores mencionan que en un estudio realizado en Reino Unido concluyeron que el punto de equilibrio para la comercialización de biocarbón fluctúa de USD \$ 205.00 a 540.00 por tonelada, entregada y depositada en el campo, aunque los costos de producción se pueden reducir entre USD \$ 28.00 a USD 416.00 por tonelada de biocarbón, al utilizar hornos tradicionales e incrementar la producción del biocarbón.

Jirka y Tomlinson (2014) mencionan que el biocarbón y mezclas de biocarbón se comercializa en varios países de América del Norte, Europa, Asia, Oceanía y África con un precio promedio de USD \$ 2.65 por kg. La mayoría de las empresas dedicadas a la producción de biocarbón realizan sus ventas desde su sitio web y viveros, lo que significa que se vende a nichos de mercado de alta gama para su uso final en jardinería, viveros, paisajismo y otros productos a pequeña escala. Los mismos

autores, señalan que se dificulta predecir las ganancias del biocarbón debido a que las principales barreras para la expansión de la industria son el desconocimiento por parte del consumidor, las limitaciones tecnológicas y el acceso al financiamiento. Al respecto, Filiberto y Gaunt (2013) indican que hace falta de realizar evaluaciones sobre la viabilidad económica del uso del biocarbón, puesto que hasta el momento solo se tienen estimaciones generales por la incertidumbre que rodea los impactos indirectos de la aplicación del biocarbón al suelo, que impiden una valoración precisa de los costos de producción. Como se puede apreciar, no existe un consenso general de los costos de producción del biocarbón, es decir, hace falta realizar más investigaciones con ese enfoque en función de las condiciones socioeconómicas locales.

Tendencias y perspectivas de investigación

A partir de la literatura revisada, se identificaron las siguientes tendencias y perspectivas de investigación:

a) Desde el punto de vista de proceso

- ❖ Determinar las condiciones óptimas para la elaboración de biocarbón mediante la evaluación de las técnicas termoquímicas, temperatura, tiempo de calentamiento, presión del reactor y adición de catalizadores. Estos factores influyen en las propiedades físicas y químicas de biocarbón.
- ❖ Caracterización de propiedades físicas y químicas de biocarbones elaborados con biomasa vegetal de disponibilidad local, para favorecer un manejo sustentable.
- ❖ Enriquecimiento de biocarbones con minerales específicos y su posterior incorporación en suelos agrícolas.
- ❖ Evaluación de biocarbón como alternativa para remediar suelos contaminados con metales pesados y por herbicidas.

b) Desde el punto de vista de uso agrícola

- ❖ Evaluar dosis de biocarbón en diferentes tipos de suelo a mediano y largo plazo, su efecto en las propiedades físicas y químicas de suelos, así como en el crecimiento y rendimiento de cultivos.
- ❖ Evaluar el efecto de la aplicación del biocarbón al suelo en combinación con fertilizantes químicos, puesto que se ha observado su efecto positivo en el crecimiento de las plantas, sin embargo, hacen falta estudios para esclarecer los mecanismos del sinergismo.
- ❖ Evaluar el efecto del biocarbón en el crecimiento y rendimiento en plantas ornamentales, así como en hierbas aromáticas y plantas medicinales, debido a que la mayoría de los estudios del efecto de biocarbón se han realizado en cereales y algunas hortalizas.
- ❖ Investigar el efecto del biocarbón sobre la actividad microbiana y su interacción con las plantas, así como el efecto sinérgico con el uso de micorrizas.
- ❖ Investigar acerca de la incorporación de biocarbón en el suelo para atenuar el efecto adverso de la presencia de elementos o sustancias contaminantes.
- ❖ Investigar mezclas de biocarbón con sustratos orgánicos no renovables, como la turba comercial con la finalidad de disminuir su uso en la agricultura protegida.

El biocarbón puede ser una alternativa para sustituir o disminuir el uso de sustratos orgánicos no renovables, tanto en la producción de plántulas como en la producción de cultivos hortícolas de alto valor.

Conclusiones

Esta revisión muestra que en los últimos 10 años existe un incremento de investigaciones en el uso de biocarbón en la agricultura, debido a que la mayoría de los estudios han reportado efectos positivos en el crecimiento y rendimiento de los cultivos agrícolas.

Es necesario incrementar las investigaciones de biocarbón elaborado con biomasa vegetal y materiales orgánicos de disponibilidad local. Debido a que la mayoría de los estudios de biocarbón en la agricultura se han realizado en cereales y algunas hortalizas, es necesario realizar investigaciones del efecto del biocarbón en plantas ornamentales, así como en hierbas aromáticas y en plantas medicinales.

Literatura citada

- Adeyemi, T. and Idowu, O. 2017. Biochar: Promoting crop yield, improving soil fertility, mitigating climate change and restoring polluted soils. *World News of Natural Sciences*. 8(1): 27-36.
<http://psjd.icm.edu.pl/psjd/element/bwmeta1.element.psjd-7281ec4c-a2bd-4ad3-9377-4cc7add7fbb5>
- Agbna, G. H. D.; Dongli, S.; Zhipeng, L.; Elshaikh, N. A.; Guangcheng, S. and Timm, L. C. 2017. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*. 222(1): 90-101.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.05.004>
- Alburquerque-Méndez, J. A.; Calero-Rodríguez, J. M.; Barrón-López de la Torre, V.; Torrent-Castellet, J.; Del Campillo-García, M. C.; Gallardo-Correa, A. y Villar-Montero, R. 2013. El biocarbón como una herramienta para limitar las emisiones de CO₂ y mejorar las propiedades del suelo en el ámbito Mediterráneo. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 10 p.
<https://www.congresoforestal.es/actas/doc/6CFE/6CFE01-549.pdf>
- Alburquerque, J. A.; Calero, J. M.; Barrón, V.; Torrent, J.; Del Campillo, M.C.; Gallardo, A. and Villar, R. 2014. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 177(1): 16-25. doi: 10.1002/jpln.201200652
- Arteaga-Pérez, L. E.; Flores, M.; Escobar, M.; Segura, C. y Gordon, A. 2015. Análisis comparativo de la torrefacción húmeda y seca de *Pinus radiata*. *Energética*. 46(1): 5-12.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147043932002>

- Bargmann, I.; Rillig, M. C.; Kruse, A.; Greef, J. M. and Kücke, M. 2014a. Initial and subsequent effects of hydrochar amendment on germination and nitrogen uptake of spring barley. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 177(1): 68-74. doi:10.1002/jpln.201300160
- Bargmann, I.; Rillig, M. C.; Kruse, A.; Greef, J. M. and Kücke, M. 2014b. Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 177(1): 48-58. doi:10.1002/jpln.201300069
- Blok, C.; van der Salm, C.; Hofland-Zijlstra, J.; Streminska, M.; Eveleens, B.; Regelink, I.; Fryda, L. and Visser, R. 2017. Biochar for horticultural rooting media improvement: evaluation of biochar from gasification and slow pyrolysis. *Agronomy*. 7(6): 1-23. doi:10.3390/agronomy7010006
- Carter, S.; Shackley, S.; Sohi, S.; Boun-Suy, T. and Haefele, S. 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy*. 3: 404-418. doi:10.3390/agronomy3020404
- Concilco-Alberto, E.; Moreno-Reséndez, A.; García-Carrillo, M.; Quiroga-Garza, H. M. y Ángel-García, O. 2018. Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera. *Terra Latinoamericana*. 36: 221-228. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.375>
- Ekpo, U.; Ross, A. B.; Camargo-Valero, M. A. and Fletcher, L. A. 2016. Influence of pH on hydrothermal treatment of swine manure: Impact on extraction of nitrogen and phosphorus in process water. *Bioresource Technology*. 214: 637-644. doi:10.1016/j.biortech.2016.05.012
- Escalante-Rebolledo, A.; Pérez-López, G.; Hidalgo-Moreno, C.; López-Collado, J.; Campos-Alves, J.; Valtierra-Pacheco, E. y Etchevers-Barra, J. D. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*. 34(3): 367-382. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57346617009>
- Filiberto, M. and Gaunt, L. J. 2013. Practicality of biochar additions to enhance soil and crop productivity. *Agriculture*. 3: 715-725. doi:10.3390/agriculture3040715

- Guo, Y.; Niu, G.; Starman, T.; Volder, A. and Gu, M. 2018. Poinsettia growth and development response to container root substrate with biochar. *Horticulturae*. 4(1): 2-14. doi:10.3390/horticulturae4010001
- Guo, M. 2020. The 3R principles for applying biochar to improve soil health. *Soil Systems*. 4(9): 1-16. doi:10.3390/soilsystems4010009
- Huang, L. and Gu, M. 2019. Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants-A review. *Horticulturae*. 5(14): 2-25. doi:10.3390/horticulturae5010014
- Ibarrola, R.; Evar, B. y Reay, D. 2013. Comercialización de Biocarbón (biochar) en México. Definición del contexto para un programa de investigación multidisciplinario. (Ed) Universidad Edimburgo, Escocia. 28 p. http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Comercializacion_de_Biochar_en_Mexico.pdf
- Iftikhar, S.; Shahzad-Ahmad, K. and Mahar-Gul, M. 2018. Low-cost and environmental-friendly *Triticum aestivum*-derived biochar for improving plant growth and soil fertility. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 49(22): 2814-2827. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1546869>
- Jirka, S. and Tomlinson, T. 2014. 2013 State of the biochar industry a survey of commercial activity in the biochar field. International Biochar Initiative (IBI). 61p.
- Kambo, H. S. and Dutta, A. 2015. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 45: 359-378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>
- Kloss, S.; Zehetner, F.; Wimmer, B.; Buecker, J.; Rempt, F. and Soja, G. 2014. Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 177: 3-15. doi: 10.1002/jpln.201200282
- Kruse, A.; Funke, A. and Titirici, M. M. 2013. Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology*. 17(3): 515-521. doi:10.1016/j.cbpa.2013.05.004

- Laghari, M.; Hu, Z.; Mirjat, M.; Xiao, B.; Tagar, A.; Hu, M. 2016. Fast pyrolysis biochar from sawdust improves quality of desert soils and enhances plant growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 96(1): 199-206. doi:10.1002/jsfa.7082
- Laghari, M.; Mirjat, M.; Hu, Z.; Fazal, S.; Xiao, B.; Hu, M.; Chen, Z. and Guo, D. 2015. Effects of biochar application rate in Sandy desert soil properties and sorghum growth. *Catena*. 135: 313-320. doi:10.1016/j.catena.2015.08013
- Liu, D.; Feng, Z.; Zhu, H.; Yu, L.; Yang, K.; Yu, S.; Zhang, Y. and Guo, W. 2020. Effects of corn straw biochar application on soybean growth and alkaline soil properties. *BioResources*. 15(1): 1463-1481.
- Manolikaki, I. and Diamadopoulos, E. 2019. Positive effects of biochar and biochar-compost on maize growth and nutrient availability in two agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 50(5): 512-526. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566468>
- Medina O., L. E. y Medina O., I. N. 2018. Prototipo autotérmico móvil para la producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoamericana*. 36: 121-129. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>
- Melo, C. A.; Junior, F. H. S.; Bisinoti, M. C.; Moreira, A. B. and Ferreira, O. P. 2016. Transforming sugarcane bagasse and vinasse wastes into hydrochar in the presence of phosphoric acid: an evaluation of nutrient contents and structural properties. *Waste and Biomass Valorization*. 8(4): 1139-1151. doi:10.1007/s12649-016-9664-4
- Mukherjee, A. and Lal, R. 2014. The biochar dilemma. *Soil Research*. 52(3): 217-230. <http://dx.doi.org/10.1071/SR13359>
- Orozco-Gutierrez, G. y de Lira-Fuentes, R. (2020). Elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos provenientes de las podas de bambú (*Guadua angustifolia*). *Revista Mexicana de Agroecosistemas*. 7: 1-9.
- Pérez-Salas, R. A.; Tapia-Fernández, A. C.; Soto, G. y Benjamin, T. 2013. Efecto del bio-carbón sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* y el desarrollo de plantas de banano (*Musa AAA*). *InterSedes: Revista Electrónica de las Sedes*

- Regionales de la Universidad de Costa Rica. 14(27): 66-100.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66627452004>
- Petter, F. A.; Leite, L. F. C.; Machado, D. M.; Marimon Júnior, B. H.; Lima, L. B.; Freddi, O. S. and Araújo, A. S. F. 2019. Microbial biomass and organic matter in an oxisol under application of biochar. *Bragantia*. 78(1): 109-118.
<http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.2018237>
- Quesada-Kimsey, J. 2012. La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. *Tecnología en Marcha*. 25(5): 14-21.
<https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.465>
- Scheifele, M.; Hobi, A.; Buegger, F.; Gattinger, A.; Schulin, R.; Boller, T. and Mäder, P. 2017. Impact of pyrochar and hydrochar on soybean (*Glycine max* L.) root nodulation and biological nitrogen fixation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 180(2): 199-211. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600419>
- Silva, I. C. B.; Fernandes, L. A.; Colen, F. and Sampaio, R. A. 2017. Growth and production of common bean fertilized with biochar. *Ciência Rural*. 47: 1-8.
- Silva, M. I.; Mackowiak, C.; Minogue, P.; Ferreira-Reis, A. Da Veiga-Moline, E. F. 2017. Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings. *Ciência Rural*. 47(1): 1-5.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33148021001>
- Steiner, C. 2016. Considerations in biochar characterization. *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, SSSA Special Publication. 63: 87-99. doi:10.2136/sssaspecpub63.2014.0038.5
- Suppadit, T.; Phumkokrak, N. and Pongasuk, P. 2012. The effect of using quail litter biochar on soybean (*Glycine max* L.) production. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 72(2): 244-251. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000200013>
- Uzoma, K. C.; Inoue, M.; Andry, H.; Fujimaki, H.; Zahoor, A. and Nishihara, E. 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*. 27: 205-212. doi:10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x
- Velázquez-Machuca, M. A.; Equihua-Soriano, J. R.; Venegas-González, J.; Montañez-Soto, J. L.; Pimentel-Equihua, J. L. y Muñoz-Navia, M. 2019. Caracterización

- física y química de biochar de lodos residuales. *Terra Latinoamericana*. 37: 243-251. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.409>
- Velázquez-Maldonado, J.; Juárez-López, P.; Anzaldo-Hernández, J.; Alejo-Santiago, G.; Valdez-Aguilar, L. A.; Alía-Tejacal, I.; López-Martínez, V.; Pérez-Arias, A. y Guillén-Sánchez, D. 2019. Concentración nutrimental de biocarbón de cascarilla de arroz. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 42(2): 129-136. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/42-2/5a.pdf>
- Verheijen, F. G. A.; Graber, E. R.; Ameloot, N.; Bastos, A. C.; Sohi, S. and Knicker, H. 2014. Biochars in soils: new insights and emerging research needs. *European Journal of Soil Science*. 65: 22-27. doi:10.1111/ejss.12127
- Videgain-Marco, M.; Marco-Montori, P.; Martí-Dalmau, C.; Jaizme-Vega, M. C.; Manyà-Cervelló, J. J. and García-Ramos, F. J. 2020. Effects of biochar application in a sorghum crop under greenhouse conditions: growth parameters and physicochemical fertility. *Agronomy*. 10 (1): 1-17. doi:10.3390/agronomy10010104
- Xu, C. Y.; Hosseini Bai, S.; Hao, Y.; Rachaputi, R. C. N.; Xu, Z. and Wallace, H. M. 2015. Peanut shell biochar improves soil properties and peanut kernel quality on a red Ferrosol. *Journal of Soils and Sediments*. 15(11): 2220-2231. doi:10.1007/s11368-015-1242-z
- Zheng, W.; Holm, N. and Spokas, K. A. 2016. Research and application of biochar in North America. In: M. Guo, Z. He, S. M. Uchimiya, (Ed), *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, SSSA Special Publication. 63: 475-494. doi:10.2136/sssaspecpub63.2014.0053

CAPÍTULO II

Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos

Resumen

El biocarbón es un material rico en carbono obtenido por conversión termoquímica elaborado de materiales orgánicos en un ambiente limitado de oxígeno, que puede usarse como mejorador de suelos. El objetivo de la investigación fue evaluar el rendimiento de biocarbón convertido, la concentración nutrimental y la estructura del biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos. El diseño experimental fue completamente al azar con seis repeticiones. Los tratamientos fueron tres catalizadores: ácido cítrico, maleico y propiónico en concentraciones al 5 y 10 % cada uno, los cuales se adicionaron en la elaboración del biocarbón; el testigo fue biocarbón sin adición de catalizador, para un total de siete tratamientos. Se determinó el rendimiento de conversión de biomasa a biocarbón, la concentración nutrimental total de N, P, Ca, Mg y el elemento Na; también se determinó la concentración extraíble de los mismos nutrimentos con excepción del Na, así como el pH y la conductividad eléctrica y la estructura del biocarbón. Los mayores rendimientos del biocarbón elaborado con ápices de caña de azúcar mediante carbonización hidrotérmica fueron de 37.8 % con la adición de ácido cítrico a 10 % como catalizador, así como 34.9 y 36.1 % con la adición de ácido maleico al 5 y 10 %, respectivamente. En general, por la concentración nutrimental total y extraíble del biocarbón, su conductividad eléctrica (0.30 – 0.46 dS m⁻¹), así como su estructura con microsferas, el biocarbón de ápices de caña de azúcar podría servir como mejorador de suelos, especialmente en suelos alcalinos debido al pH ácido del biocarbón producido.

Palabras clave: carbonización hidrotérmica; catalizadores orgánicos; concentración nutrimental; mejorador de suelos; *Saccharum officinarum*.

Chemical characterization of biochar from sugarcane tips produced by hydrothermal carbonization and addition of organic catalysts

Summary

Biochar is a carbon-rich material obtained by thermochemical conversion produced from organic materials in an oxygen-limited environment, which can be used as a soil enhancer. The objective of the research was to evaluate the yield of converted biochar, nutrient concentration and structure of sugarcane tips biochar produced by hydrothermal carbonization and addition of organic catalysts. The experimental design was completely randomized with six replicates. Treatments were three catalysts: citric, maleic and propionic acid in 5 and 10 % concentrations each, which were added during biochar production. The respective control was biochar without addition of any catalyst, for a total of seven treatments. The biomass to biochar conversion yield and the total nutrient concentration of N, P, Ca, Mg and Na were determined. The extractable concentration of the same nutrients except for Na was also determined, as well as the pH and the electrical conductivity and structure of the biochar. The highest yields of biochar made from sugarcane tips by hydrothermal carbonization were 37.8 % with the addition of citric acid at 10 % as catalyst, as well as 34.9 and 36.1 % with the addition of maleic acid at 5 and 10 %, respectively. In general, due to the total and extractable nutrient concentration of biochar, its electrical conductivity (0.30 - 0.46 dS m⁻¹), as well as its microsphere structure, sugarcane tips biochar could act as a soil enhancer, especially in alkaline soils due to the acid pH of the biochar produced.

Key words: hydrothermal carbonization; organic catalysts; nutrient concentration; soil improver; *Saccharum officinarum*.

Introducción

El biocarbón es un material sólido rico en carbono que se obtiene por la conversión termoquímica de materiales orgánicos en un ambiente limitado o carente de oxígeno (Zheng *et al.*, 2016), el cual tiene propiedades físicas y químicas aptas para el

almacenamiento de carbono a largo plazo en un medio natural y, potencialmente, mejora de la fertilidad de los suelos (Ibarrola *et al.*, 2013).

El biocarbón posee estabilidad y por ello, su aplicación al suelo como mejorador presenta dos ventajas principales: la primera, es por el secuestro del carbono, ya que el suelo actúa como un almacén o reservorio, reduciendo de este modo las emisiones directas de carbono a la atmósfera (Steiner, 2016); la segunda ventaja es que mejora la capacidad del suelo para retener la humedad, la cual se debe a su morfología altamente porosa, aumento en la capacidad de intercambio catiónico (Gallo-Saravia *et al.*, 2019; Adeyemi y Idowu, 2017), así como liberación lenta de nutrientes (Ibarrola *et al.*, 2013).

Existen varias técnicas termoquímicas para la producción de biocarbón, tales como pirolisis (lenta, rápida, y ultrarrápida), gasificación, y carbonización hidrotérmica (*HTC*, por sus siglas en inglés) (Adeyemi y Idowu, 2017; Zheng *et al.*, 2016). Las técnicas de pirolisis y gasificación requieren que la materia prima (biomasa o residuos) esté seca previo al proceso de carbonización, sin embargo, esta etapa se puede omitir con la técnica de carbonización hidrotérmica, la cual es una ventaja para el aprovechamiento de residuos con elevado contenido de agua o residuos de cosechas recién cortados (Quesada-Kimzey, 2012).

En México las investigaciones de biocarbón con fines agrícolas son incipientes, sin embargo, existe un interés creciente en la elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos de cosecha y de residuos industriales. Orozco-Gutiérrez y Lira-Fuentes (2020) reportaron rendimiento de 27 % en biocarbón elaborado a 550 °C a partir de ramas de bambú *Guadua angustifolia*. Velázquez-Machuca *et al.* (2019) concluyeron que el biocarbón de lodos residuales puede usarse como mejorador de suelos agrícolas por su alto contenido nutrimental y su bajo contenido de metales tóxicos. Medina y Medina (2018) construyeron y evaluaron un equipo de pirólisis lenta, autotérmico y móvil con capacidad para procesar de 300 a 400 kg de biomasa; con el equipo mencionado elaboraron biocarbón a partir de ramas podadas de aguacate, con

un rendimiento de 16 % de biocarbón, pH alcalino (10.25) y alta capacidad de intercambio catiónico (46 cmolc kg⁻¹). Mientras que, Concilco *et al.* (2018) al evaluar un biocarbón comercial de bambú en el cultivo de avena forrajera, reportaron que la aplicación de 25 t ha⁻¹ de biocarbón con fertilización química 120-60-00 (NPK) aumentó 34 % la altura de planta y 103 % la materia fresca en comparación con el tratamiento testigo.

Por otra parte, Wang y Wang (2019) mencionan que la función de la adición de ácidos en la elaboración de biocarbón es eliminar impurezas, metales pesados e introducir grupos carboxilos en la superficie del biocarbón para mejorar su estructura; asimismo, se ha reportado que la adición de ácidos como catalizadores en el proceso de elaboración del biocarbón puede mejorar sus propiedades físicas y químicas, como se ha observado en biocarbón elaborado con residuos agroindustriales mediante la técnica de carbonización hidrotérmica (Chaparro-Garnica *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2017). Velázquez-Maldonado *et al.* (2019) con la adición de catalizadores orgánicos en la elaboración de biocarbón de cascarilla de arroz, obtuvieron un incremento en el rendimiento de conversión de la biomasa inicial, así como mayor materia orgánica y concentración nutrimental. Estos mismos autores concluyeron que por sus características de rendimiento, materia orgánica y concentración nutrimental el biocarbón de cascarilla de arroz puede utilizarse como mejorador de suelo; sin embargo, también indican que es necesario realizar más estudios para conocer las características químicas de biocarbones elaborados con otros materiales vegetales.

Generalmente, la estructura del biocarbón es amorfa, constituida por partículas de diferentes tamaños, lo que depende de la materia prima, de la técnica y el tiempo en la elaboración del biocarbón (Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016). En este sentido, Sevilla y Titirici (2012) mencionan que la temperatura de conversión influye en el diámetro y en la distribución del tamaño de las partículas. La estructura porosa del biocarbón puede ser la responsable de la elevada capacidad de retención de agua, además, es un hábitat idóneo para la proliferación de microorganismos que mejoran el suelo (Stadler-Kaulich y Hernando-Perteguer, 2018).

La elaboración de biocarbón es una técnica que se puede implementar donde hay suficiente biomasa disponible para ser usados como materia prima y que estos materiales no compitan con otros usos, principalmente si se generan productos de mayor valor económico (Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016). Por otro lado, en México, el cultivo de caña de azúcar se siembra en 16 entidades federativas. En el 2019, se reportó una superficie cosechada de 781 567.87 ha, con una producción de 58 894 343.71 t (SIAP, 2020). Aunque la cantidad de residuos orgánicos que genera el cultivo de la caña de azúcar depende de varios factores como variedad de la caña, niveles de productividad, fechas de cosecha y la eficiencia de la cosechadora en el corte, así como la recolección y limpieza (Ortiz-Laurel *et al.*, 2012), en general, el cultivo de la caña de azúcar produce residuos (punta o cogollo) entre 35 y 60 t por ha (Guerrero-Peña *et al.*, 2017), los cuales se pueden aprovechar en la producción de biocarbón. Por lo anteriormente expuesto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento de biocarbón convertido, la concentración nutrimental y la estructura del biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado con carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos.

Materiales y métodos

Material vegetal, tratamientos y elaboración de biocarbón

Los ápices de caña de azúcar (ACa) se cosecharon el 15 junio de 2018 en Zapopan, Jalisco. El biocarbón se elaboró del 16 al 25 del mismo mes y las variables se evaluaron durante julio y agosto del mismo año. El biocarbón se elaboró mediante la técnica de carbonización hidrotérmica (HTC, por sus siglas en inglés) descrita por Velázquez-Maldonado *et al.* (2019). Los ACa se cortaron en trozos de 5 cm, se pesaron 200 g los cuales contenían humedad de 55.73 % y se les adicionó agua destilada (88.54 mL) para obtener una humedad final de 100 %. Los tratamientos consistieron en la adición de ácido cítrico, maleico y propiónico como catalizadores en dos concentraciones cada uno (5 y 10 %); el tratamiento testigo fue biocarbón al que se adicionó agua destilada (sin catalizador), para un total de siete tratamientos. Posteriormente, las muestras se colocaron en un reactor modelo JAYME marca Deutsch and Neumann®, durante 19 h a 200 °C; después del tiempo transcurrido, se

dejó enfriar el reactor a temperatura ambiente. Al material obtenido se le realizó un triple lavado (agua destilada-etanol 96 %-agua destilada) y filtrado. Por último, el biocarbón se secó en una estufa de aire circulante (modelo F210 marca Felisa®) a 70 °C durante 12 h. En la Figura 1 se muestra el material vegetal de ápices de caña de azúcar antes y después de la carbonización hidrotérmica.



Figura 1. a) Biomasa de ápices de caña de azúcar. b) Biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica.

Rendimiento de biocarbón

El rendimiento del biocarbón se determinó mediante la diferencia entre el peso de los ápices de caña de azúcar (biomasa inicial) y el peso de los ápices de caña de azúcar convertidos en biocarbón; posteriormente, los valores obtenidos se expresaron en porcentaje.

Concentración nutricional

La concentración total de N se determinó por el método Kjeldahl, P total por el método de molibdato de sodio con p-metilaminofenol sulfato en un espectrofotómetro ultravioleta visible modelo SQ-UV2800, marca UNICO®; los contenidos totales de K, Ca, Mg y Na por digestión ácida y espectrofotometría de absorción atómica modelo 932 Plus, marca GBC® (Cottenie, 1994); asimismo, el análisis de elementos extraíbles de P, K, Ca y Mg se realizó según las metodologías descritas por la Iniciativa Internacional del Biocarbón (IBI, 2015). También se determinó el pH en agua con

relación 1:20 por potenciometría y la conductividad eléctrica en relación 1:20 con un conductímetro en el mismo recipiente usado para medir pH (IBI, 2015).

Estructura de biocarbones

La estructura de los biocarbones se analizó por microscopía electrónica de barrido (*SEM*, por sus siglas en inglés) con un microscopio modelo MIRA 3 LMU, marca TESCAN®. Se molió 0.01 g de biocarbón en morteros ágata y se colocó en un portaobjeto con una cinta adhesiva doble cara, sobre la cinta adhesiva se colocó una capa fina de las muestras. Posteriormente, a las muestras adheridas se les agregó oro con un dispositivo de pulverización catódica modelo SPI-MODULE Sputter Coater, marca SPI SUPPLIES®, según metodología descrita por Varela *et al.* (2013).

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar con seis repeticiones. Para asegurar la normalidad, los datos expresados en porcentaje se transformaron con la raíz cuadrada del arcoseno. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza y prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el programa estadístico SAS versión 9.1 (SAS Institute, 2004).

Resultados y discusión

Rendimiento de biocarbón

La adición de ácidos orgánicos como catalizadores en la elaboración de biocarbón de ápices de caña de azúcar mediante carbonización hidrotérmica (HTC), influyó en el rendimiento del biocarbón convertido en comparación con el testigo (Cuadro 1). Hubo diferencias entre los tratamientos ($P \leq 0.05$). La adición de ácido cítrico al 10 %, y el ácido maleico al 5 y 10 % fueron estadísticamente iguales. Los ácidos orgánicos anteriormente mencionados presentaron los mayores valores en rendimiento con 37.8, 34.9 y 36.1 %, respectivamente, esto representa un incremento de conversión de la biomasa a biocarbón de 8.2, 5.3 y 6.5 % respectivamente, comparado con el tratamiento testigo. Velázquez-Maldonado *et al.* (2019) reportaron rendimiento de 66 % con la adición de ácido maleico y ácido cítrico al 10 %, en la elaboración de

biocarbón de cascarilla de arroz mediante HTC. Al respecto, Lynam *et al.* (2012) mencionan que el rendimiento del biocarbón se ve influenciado por el uso de catalizadores durante el proceso de carbonización hidrotérmica, es decir, favorece el proceso de hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa de los materiales vegetales. Durante el proceso de carbonización hidrotérmica se producen reacciones de hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, aromatización, policondensación y polimerización para producir diversos materiales carbonosos, como esferas de carbono y nano fibras de carbono (Zhang *et al.* 2020). Además, la adición de catalizadores proporciona una funcionalización química en la superficie del biocarbón (Xue *et al.* 2018; Román *et al.* 2012).

Cuadro 1. Rendimiento, concentración total de macronutrientes y de sodio (Na) en biocarbón de ápices de caña de azúcar con tres catalizadores.

Tratamientos	Rendimiento	N	P	K	Ca	Mg	Na
	-----%-----						
Testigo (sin catalizador)	29.6 cd*	1.789 a	0.121 b	0.240 cd	0.029 a	0.178 ab	0.232 ab
Ácido cítrico 5 %	32.2 bc	1.446 b	0.162 a	0.185 d	0.018 ab	0.087 bc	0.246 ab
Ácido cítrico 10 %	37.8 a	1.103 c	0.109 b	0.419 a	0.018 ab	0.257 a	0.251 a
Ácido maleico 5 %	34.9 ab	1.299 bc	0.123 b	0.325 bc	0.024 ab	0.105 bc	0.241 ab
Ácido maleico 10 %	36.1 ab	1.372 bc	0.169 a	0.340 ab	0.029 a	0.055 c	0.243 ab
Ácido propiónico 5 %	27.3 d	1.201 bc	0.132 b	0.185 d	0.013 b	0.176 ab	0.246 ab
Ácido propiónico 10 %	29.6 cd	1.421 b	0.163 a	0.334 ab	0.028 a	0.237 a	0.226 b
DMS	3.9	0.289	0.029	0.092	0.012	0.118	0.023

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Singh *et al.* (2018) reportaron rendimiento de 52.5 % en la conversión de la materia prima utilizando bagazo de caña de azúcar mediante la técnica de pirólisis a 400 °C. Silva *et al.* (2017) en la elaboración de biocarbón con mezcla de vinaza y bagazo de caña de azúcar mediante HTC, encontraron un rendimiento entre 17.6 a 46.5 % en función de la temperatura y el tipo de catalizador empleado (ácido sulfúrico, fosfórico, bórico, hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, cloruro ferroso tetrahidratado y sulfato de amonio); el mayor rendimiento del biocarbón se obtuvo con temperatura de 150 °C

con ácido sulfúrico, fosfórico e hidróxido de sodio como catalizadores. Recientemente, Orozco-Gutiérrez y Lira-Fuentes (2020) reportaron que el rendimiento del biocarbón aumentó de 10 a 27 % con temperaturas de 350 a 550 °C, mientras que temperatura por encima de 550 °C disminuyó el rendimiento del biocarbón elaborado de bambú (*Guadua angustifolia*) mediante pirólisis lenta.

En adición a lo anterior, Schlegel *et al.* (2018) menciona que un factor importante a considerar en el rendimiento del biocarbón es la composición de la materia prima, debido a que se relaciona directamente con la eficiencia de conversión y calidad, es decir, para que la eficiencia de conversión de materia prima a biocarbón sea alta, el material vegetal debe ser rico en lignina respecto a la celulosa. Asimismo, se ha reportado que los parámetros de temperatura, tiempo de reacción, pH del medio de reacción y la adición de catalizadores influyen sobre el rendimiento y propiedades físicas y químicas del biocarbón (Silva *et al.*, 2017; Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016).

Concentración total de nutrimentos

Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($P \leq 0.05$). Con excepción del N, al menos una concentración de catalizador presentó valores similares o mayores en la concentración nutrimental (Cuadro 1). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Velázquez-Maldonado *et al.* (2019) quienes mencionan que la adición de catalizadores orgánicos favoreció la concentración de macronutrimentos en biocarbón de cascarilla de arroz. Por otra parte, Silva *et al.* (2017) reportaron que en biocarbón mezcla de vinaza y bagazo de caña de azúcar, el N aumentó al utilizar H_3BO_3 como catalizador en el medio de reacción, sin embargo, al usar $(NH_4)_2SO_4$ incrementó la concentración de N, K y Ca, la adición de H_2SO_4 aumentó solo el K, mientras que al agregar H_3PO_4 se incrementaron las concentraciones de K, Mg, Ca y P, en tanto que el Mg aumentó al utilizar NaOH y KOH como catalizadores.

Con excepción de la concentración de Ca que varió de 0.18 a 15.8%, los valores encontrados en el presente estudio se encuentran dentro de los intervalos de concentración nutrimental reportados por Cho *et al.* (2017) quienes en cinco

biocarbones elaborados a partir de astillas de pino, viruta de roble, piña de pino, cascarilla de arroz y caparazón de cangrejo, encontraron concentraciones en porcentaje: N (0.07-3.63), P (0.026-1.21), K (0.097-0.645), Mg (0.075-1.04) y Na (0.035-0.734). Por otro lado, los valores de N y P del presente estudio son menores a los reportados por Bento *et al.* (2019) quienes encontraron 3.42 % para N y 4.71 % para P en biocarbón elaborado de mezcla de vinaza y bagazo de caña de azúcar mediante la técnica de HTC con ácido fosfórico como catalizador. Es decir, la composición de la materia prima, técnica de conversión, temperatura, entre otros factores influyen sobre las características químicas del biocarbón. En cuanto al elemento Na, los valores obtenidos (0.226 - 0.251 %) se encuentran dentro del intervalo indicado por Alcántar-González y Trejo-Téllez (2012) quienes mencionan que el Na total puede encontrarse en niveles entre 0.1 y 1 %.

pH y conductividad eléctrica

En cuanto a pH y conductividad eléctrica (CE) hubo diferencias ($P \leq 0.05$), (Cuadro 2). El pH obtenido varió de 4.46 (ácido cítrico 10 %) a 6.75 (ácido propiónico 5 %). La CE de los biocarbones varió de 0.30 dS m⁻¹ (ácido cítrico al 5 %) a 0.46 dS m⁻¹ (ácido maleico al 10 %). Estos dos parámetros son de importancia ya que el pH y la CE se utilizan como indicadores de disponibilidad de nutrimentos y concentración de sales cuando son aplicados al suelo. Los resultados obtenidos son aproximados a los reportados por Silva *et al.* (2017) en biocarbón mezcla de vinaza y bagazo de caña de azúcar utilizando HTC, quienes encontraron que, con y sin catalizadores el pH varió entre 3.95 a 5.05. Por su parte, Bento *et al.* (2019) reportaron que el valor de pH de 3.54 en biocarbón mezcla de vinaza y bagazo de caña de azúcar elaborados con HTC a 230 °C con ácido fosfórico como catalizador puede deberse a la presencia de grupos carboxílicos en la estructura de los biocarbones.

Cuadro 2. pH, CE y concentración nutrimental extraíble en biocarbón de ápices de caña de azúcar con tres catalizadores.

Tratamientos	pH	CE dS m ⁻¹	P	K	Ca	Mg
Testigo	5.53 c*	0.23 d	64.04 d	1298.86 a	97.39 ab	470.80 a
Ácido cítrico 5 %	5.22 c	0.30 cd	128.88 ab	652.36 c	80.07 b	576.64 a
Ácido cítrico 10 %	4.46 d	0.44a	74.38 cd	1213.71 a	88.31 b	567.19 a
Ácido maleico 5 %	4.71 d	0.40 ab	150.85 a	958.28 b	79.24 b	562.37 a
Ácido maleico 10 %	4.60 d	0.46 a	136.26 a	724.14 c	79.24 b	258.75 b
Ácido propiónico 5 %	6.75 a	0.33 bc	97.78 bc	702.86 c	124.61 a	437.07 a
Ácido propiónico 10 %	6.20 b	0.32 bc	60.83 d	546.76 c	79.24 b	176.83 b
DMS	0.38	0.09	31.47	208.01	36.25	149.05

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Velázquez-Machuca *et al.* (2019) reportaron pH cercanos a neutro (6.33 a 7.33) y CE entre 0.522 a 3.11 dS m⁻¹ en biocarbón de lodos residuales elaborados mediante la técnica de pirolisis a temperaturas de 280-330 °C. Mientras Medina y Medina (2018) reportaron en biocarbón de esquilmos de aguacate (*Persea americana*) elaborado con la técnica de pirolisis lenta con temperaturas entre 360 a 700 °C, valores de pH alcalinos (10.25) y bajo contenido de sales 0.92 dS m⁻¹. De igual forma, Concilco *et al.* (2018) en biocarbón comercial de biomasa de bambú (*Bambusa oldhammi*) elaborado por pirólisis a 650 °C, reportaron pH de 8.85 y CE de 2.55 dS m⁻¹. Además, Cho *et al.* (2017) en biocarbones elaborados a partir de astillas de pino, astillas de roble, piña de pino, cascarilla de arroz y caparazón de cangrejo a temperaturas entre 200 a 250 °C, reportaron valores de pH entre 5.1 a 8.8 y CE entre 0.005 a 1.24 dS m⁻¹, en dependencia de la materia prima utilizada.

Los valores de pH de la mayoría de los biocarbones del presente estudio elaborados con la técnica de HTC indican que son ácidos por lo que pueden ser una alternativa para utilizarse como enmiendas en suelos o sustratos alcalinos, mientras que los

biocarbones con pH altos pueden potencialmente sustituir al encalado agrícola que se recomienda para enmendar suelos ácidos.

Concentración extraíble de nutrimentos

Se obtuvieron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos, según el catalizador empleado (Cuadro 2). Al igual que en concentración total de macronutrimentos, al menos una concentración de los catalizadores tuvo valores similares o superiores al testigo; al respecto, no se encontraron reportes en la literatura revisada respecto a la concentración nutrimental extraíble en biocarbones asociada a los catalizadores utilizados en el presente estudio. Sin embargo, Bento *et al.* (2019) reportan concentraciones nutrimentales extraíbles de 2.82 % de K, 2.21 % de Ca, 2.67 % de Mg en biocarbones elaborados con mezcla de vinaza y bagazo de caña de azúcar.

Los resultados del presente estudio indican que el uso de ácidos orgánicos utilizados favoreció la concentración de algunos macronutrimentos totales y extraíbles en el biocarbón de ápices de caña de azúcar, ya que la mayoría de los minerales fueron superiores al testigo (sin catalizador). Silva *et al.* (2017) concluyeron que los catalizadores influyen en la inmovilización de los macronutrimentos del biocarbón y la naturaleza química de cada catalizador puede repercutir en la concentración nutrimental; asimismo, mencionan que la inmovilización de los macros y micronutrimentos ocurre por adsorción en la superficie del biocarbón, así como también por la precipitación de compuestos insolubles. Bento *et al.* (2019) indican que la presencia de grupos funcionales como ácidos carboxílicos en la estructura química del biocarbón puede proporcionar mayor capacidad de absorción de cationes metálicos como el Ca, Mg y Fe. La cantidad de grupos hidroxilo y carboxilo en la superficie del biocarbón depende del tipo ácido empleado como catalizador en el medio de reacción, por ejemplo, el ácido cítrico aporta tres grupos carboxilos, mientras que el ácido maleico y propiónico aportan dos y un grupo carboxílicos, respectivamente.

Es necesario realizar más investigaciones sobre las características químicas de biocarbones para utilizarse como enmienda de suelos, sobre todo cuando se usan nuevos materiales vegetales, ya que las propiedades del biocarbón son afectadas por la composición de la materia prima, técnicas termoquímicas empleadas en su elaboración, intervalo de calentamiento, temperatura, presión del reactor y uso de catalizadores (Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016).

Estructura del biocarbón

En las micrografías se observaron microesferas de carbón con los tres catalizadores empleados y con el testigo (Figura 2). Los valores promedio del diámetro de las microesferas fueron: testigo (sin catalizador), 0.706 μm ; ácido cítrico (5 %), 1.333 μm ; ácido cítrico (10 %), 0.329 μm ; ácido maleico (5 %), 1.799 μm ; ácido maleico (10 %), 2.354 μm ; ácido propiónico, (5 %), 0.708 μm ; y ácido propiónico (10 %), 0.999 μm . El diámetro de las microesferas del presente estudio es mayor a los reportados por Velázquez-Maldonado *et al.* (2019) quienes en biocarbón de cascarilla de arroz obtuvieron valores de 0.055 a 0.084 μm , estos resultados podrían deberse a la composición de la materia prima de la cascarilla de arroz, la cual es rica en lignina en comparación a la celulosa que contienen los ápices de caña. Estos mismos autores, mencionan que los biocarbones elaborados con la técnica HTC generalmente son de pH ácidos, con superficie porosa, con mejor capacidad de adsorción al incrementar su superficie de área. Blanco-Canqui (2017) señala que las partículas del biocarbón pueden mezclarse con el suelo y formar agregados más grandes, lo cual mejora su estructura.

En este contexto, el aumento de la concentración de ácido maleico y propiónico al 10 % como catalizadores influyó en el tamaño de las microesferas de carbón, ya que hubo una tendencia de incremento de tamaño comparado con las concentraciones al 5 %, lo que representa en proporción un aumento de 30.85 y 41.10 %, respectivamente; sin embargo, al utilizar el ácido cítrico al 10 % como catalizador el tamaño de las microesferas se redujo en 75.32 % con respecto a la concentración del 5 %; esa misma tendencia fue reportada por Velázquez-Maldonado *et al.* (2019).

Las microesferas en la superficie del biocarbón de ápices de caña de azúcar están asociadas con la descomposición de la celulosa. Román *et al.* (2012) indican que la recombinación de productos de carbono a partir de reacciones de descarboxilación, así como la ruptura de la celulosa, pueden formar nuevas estructuras de microesferas. En este sentido, el tamaño de las microesferas de carbón y la porosidad dependen de la materia prima, catalizadores y técnica empleada en la elaboración del biocarbón. Por las propiedades físicas de su estructura y las características químicas del biocarbón de ápices de caña de azúcar, su incorporación al suelo como enmienda podría mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas debido al incremento en la aireación, adsorción de nutrimentos e incremento poblacional de hongos micorrícicos (Velázquez-Maldonado *et al.* 2019; Singh *et al.* 2018; Escalante-Rebolledo *et al.* 2016).

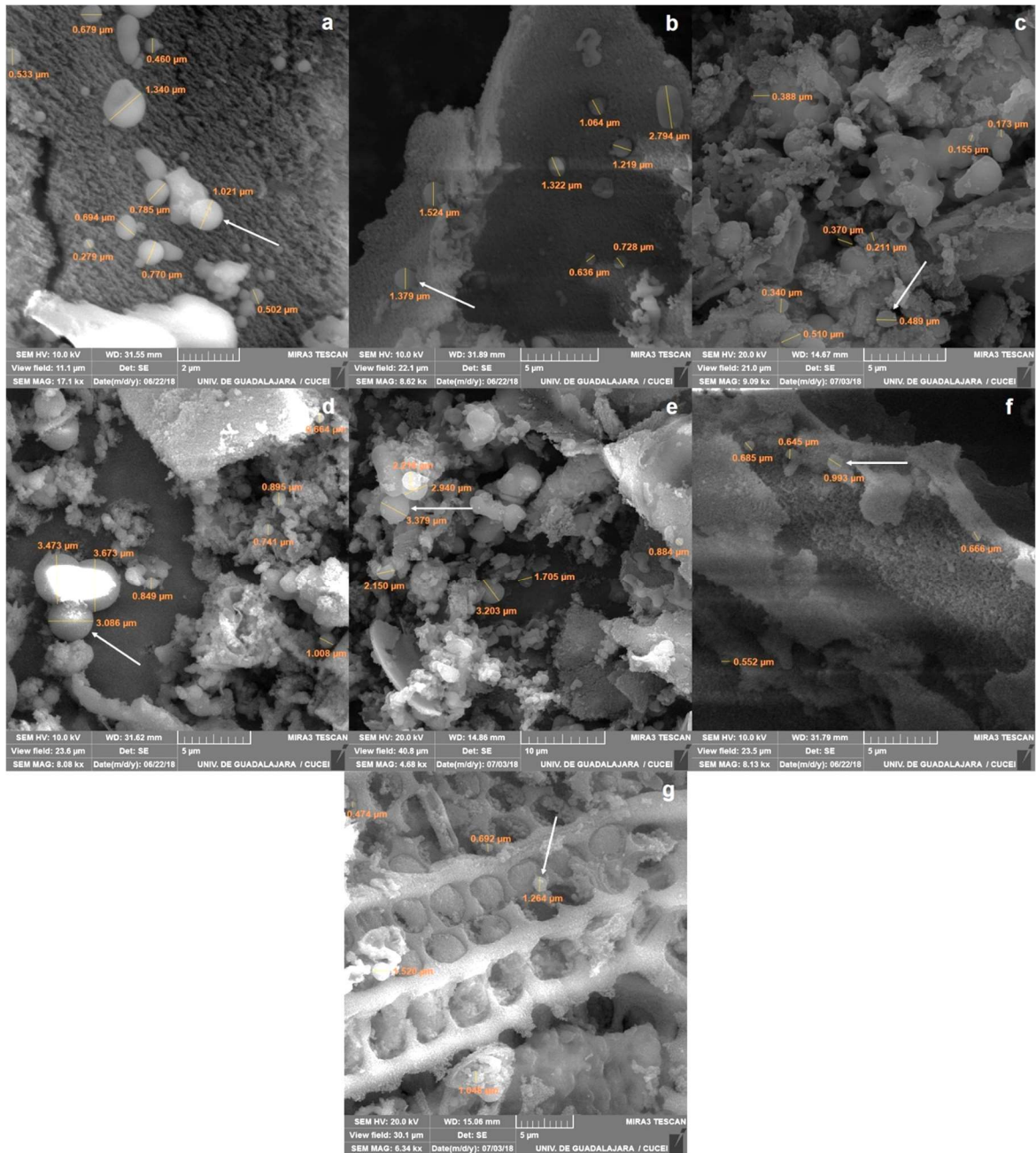


Figura 2. Microesferas en el biocarbón de ápices de caña de azúcar con tres catalizadores. a) testigo (sin catalizador), b) ácido cítrico al 5 %, c) ácido cítrico al 10 %, d) ácido maleico al 5 %, e) ácido maleico al 10 %, f) ácido propiónico al 5 % y g) ácido propiónico al 10 %. Las fechas señalan la presencia de microesferas de carbón en cada micrografía.

Con los resultados obtenidos en biocarbón de ápices de caña de azúcar, se sugiere realizar investigaciones para determinar las características químicas, así como para conocer la estructura de biocarbones cuando se pretende usar nuevos materiales vegetales para su uso potencial como mejorador de suelos agrícolas, debido a que sus propiedades dependen principalmente de la materia prima empleada para elaborar el biocarbón.

Conclusiones

Los mayores rendimientos del biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica (34.9 - 37.8 %) se obtuvieron con la adición de ácido cítrico a 10 %, y ácido maleico al 5 y 10 % como catalizadores. En general, por la concentración nutrimental total y extraíble del biocarbón, su conductividad eléctrica (0.30 – 0.46 dS m⁻¹), así como su estructura con microsferas, el biocarbón de ápices de caña de azúcar podría servir como mejorador de suelos, especialmente en suelos alcalinos debido al pH ácido del biocarbón producido.

Literatura citada

- Adeyemi, T. O. A. y Idowu, O. D. (2017). Biochar: promoting crop yield, improving soil fertility, mitigating climate change and restoring polluted soils. *World News of Natural Sciences*, 8, 27-36. <https://www.researchgate.net/publication/316583270>
- Alcántar-González, G. y Trejo-Téllez, L.I. (2012). Nutrición de cultivos. México, Texcoco: Colegio de Postgraduados. 454 p.
- Bento, L. R., Castro, A. J. R., Moreira, A. B., Ferreira, O. P., Bisinoti, M. C. y Melo, C. A. (2019). Release of nutrients and organic carbon in different soil types from hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinase. *Geoderma*, 334, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.034>
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81: 687-711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- Concilco, A., Moreno-Reséndez, A., García-Carrillo, M., Quiroga-Garza, H. M. y García, O. A. (2018). Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos

- de rendimiento y calidad de avena forrajera. *Terra Latinoamericana*, 36, 221-228. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.375>
- Cottenie, A. (1994). Workshop on Standardization of Analytical Methods for Manure, Soil Plant and Water. Commission European Communities. FAO Soils Bulletin 38/2. 28-33.
- Chaparro-Garnica, J., Mostazo-López, M. J., Salinas-Torres, D., Morallón, E. y Cazorla-Amorós, D. (2020). Residuos de biomasa como plataforma para obtener materiales carbonosos porosos mediante carbonización hidrotermal en presencia de H₃PO₄. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 55, 22-27. <http://hdl.handle.net/10045/108197>
- Cho, M. S., Meng, L., Song, J. H., Han, S. H., Bae, K. y Park, B. B. (2017). The effects of biochars on the growth of *Zelkova serrata* seedlings in a containerized seedling production system. *Forest Science and Technology*, 13(1), 25-30. <https://doi.org/10.1080/21580103.2017.1287778>
- Escalante-Rebolledo, A., Pérez-López, G., Hidalgo-Moreno, C., López-Collado, J., Campos-Alves, J., Valtierra-Pacheco, E. y Etchevers-Barra, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57346617009>
- Gallo-Saravia, M., Lugo-Sierra, L. y Barrera-Zapata, R. (2019). Evaluación de biochar como alternativa de sustrato en cultivos de tomate. *Scientia et Technica*, 23(2), 296-302. <https://doi.org/10.22517/23447214.17691>
- Guerrero-Peña, A., Gómez-Merino, F. C., Hernández-Cázares, A. S., Salinas-Ruiz, J. y Velasco-Velasco, J. (2017). Residuos orgánicos de la agroindustria azucarera: retos y oportunidades. *Agroproductividad*, 10(11), 99-104. <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/56>
- Ibarrola, R., Evar, B. y Reay, D. (2013). Comercialización de biocarbón (biochar) en México. Definición del contexto para un programa de investigación multidisciplinario. En Universidad de Edimburgo (Ed). (pp. 1-24). http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Comercializacion_de_Biochar_en_Mexico.pdf

- International Biochar Initiative (IBI). (2015). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>
- Lynam, J. G., Toufic, R.M., Vasquez, V.R. y Coronella, C.J. (2012). Effect of salt addition on hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. *Fuel*, 99:271-273. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.035>
- Medina, O. L. E., y Medina, I. N. O. (2018). Prototipo autotérmico móvil para la producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 121-129. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>
- Orozco-Gutiérrez, G. y Lira-Fuentes, R. C. (2020). Elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos proveniente de las podas de bambú (*Guadua angustifolia*). *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 7(1), 1-9.
- Ortiz-Laurel, H., Salgado-García, S., Castelán-Estrada, M. y Córdova-Sánchez, S. (2012). Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (Especial) 4, 767-773. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900020&lng=es&tlng=es
- Quesada-Kimsey J. (2012). La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. *Tecnología en Marcha*, 25(5), 14-21. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.465>
- Román, S., Nabais, J.M.V., Laginhas, C. Ledesma, B y González, J.F. (2012). Hydrothermal carbonization as an effective way of densifying the energy content of biomass. *Fuel Processing Technology*, 103, 78-83. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.11.009>
- SAS Institute. (2004). SAS/STAT User's Guide. Release 9.1. SAS Institute. Cary, North Carolina, USA. p. 5121
- Schlegel, M. M., Ibrahim, B., Kipping-Rössel, D., Ortiz-Laurel, H. y Fras, J. (2018). Generación de biocarbón a partir del material sólido en la hidrólisis aeróbico-microbiológica. *Agroproductividad*, 11(11), 27-33.

- Sevilla, M. y Titirici, M.M. (2012). Hydrothermal carbonization: a greener route towards the synthesis of advanced carbon materials. *Bol. Grupo Español Carbón*, 25, 7-17.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Consultado el 02 de noviembre, 2020). <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Silva, C. C., Melo, C. A., Soares-Junior, F. H., Moreira, A. B., Ferreira, O. P. y Bisinoti, M. C. (2017). Effect of the reaction médium on the immobilization of nutrients in hydrochars obtained using sugarcane industry residues. *Bioresource Technology*, 237, 213-221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.004>
- Singh, A., Singh, A. P. y Purakayastha, T. J. (2018). Characterization of biochar and their influence on microbial activities and potassium availability in an acid soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9), 1302-1315. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1563291>
- Stadler-Kaulich, N. y Hernando-Perterguer, A. (2018). Más Allá de la agroforestería. El biocarbón activado y la madera rameal fragmentada: utilización y preparación en Mollesnejta. *Acta Nova*, 8(4), 572-592. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892018000200006&lng=es&tlng=es
- Steiner, C. (2016). Considerations in biochar characterization. En: M. Guo, Z. He, S. M. Uchimiya, (Ed), *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, SSSA Special Publication 63, 87-99. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub63.2014.0038.5>
- Varela, M. O., Rivera, E. B., Huang, W. J., Chien, C. C. y Wang, Y. M. (2013). Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochars and their effect on the growth of water spinach in a field test. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(2), 251-266. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000022>
- Velázquez-Machuca, M. A., Equihua-Soriano, J. R., Venegas-González, J., Montañez-Soto, J. L., Pimentel-Equihua, J. L. y Muñoz-Navia, M. (2019). Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 243-251. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.409>

- Velázquez-Maldonado, J., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alejo-Santiago, G., Valdez-Aguilar, L. A., Alia-Tejacal, I., López-Martínez, V., Pérez-Arias, G. A. y Guillén-Sánchez, D. (2019). Concentración nutrimental de biocarbón de cascarilla de arroz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 129-136. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018773802019000200129&lng=es&tlng=es
- Wang, J. y Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002-1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
- Xu, Y., Xia, M., Jiang, Y., Li, F. y Xue, B. (2018). Opal promotes hydrothermal carbonization of hydroxypropyl methyl cellulose and formation of carbon nanospheres. *RSC Adv*, 8, 20095-20107. <https://doi.org/10.1039/c8ra01138a>
- Zhang, Y.F., Dai, J.M., Guo, H., Shi, S., Yan, Z.F. y Hou, W.S. (2020). A comparative study of carbon microsphere preparation by the hydrothermal carbonization of waste cotton fibers, viscose fibers and Avicel. *New Carbon Materials*, 35(3): 286-294. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(20\)60490-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(20)60490-5)
- Zheng, W., Holm, N., y Spokas, K. A. (2016). Research and application of biochar in North America. En: M. Guo, Z. He, S. M. Uchimiya, (Ed), *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, SSSA Special Publication, 63, 475-494. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub63.2014.0053>

CAPITULO III

Biocarbones de cascarilla de arroz y ápices de caña de azúcar en el crecimiento de lechuga orejona (*Lactuca sativa* var. *longifolia*)

Resumen

El biocarbón es un material sólido poroso que puede ser elaborado a partir de residuos agrícolas mediante técnicas termoquímicas y su aplicación en el suelo podría mejorar el crecimiento de especies hortícolas. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de dos biocarbones en el crecimiento de lechuga orejona (*Lactuca sativa* var. *longifolia*) cv. Tinajero cultivada en invernadero. Los biocarbones de cascarilla de arroz (BCA) y de ápices de caña de azúcar (BACA) se elaboraron mediante carbonización hidrotérmica a 200 °C. Los tratamientos fueron dosis de los biocarbones: 0 (testigo), 7, 14 y 21 % de volumen de cada biocarbón mezclado con suelo de textura franco-arenoso. Las variables de crecimiento evaluadas en plantas de lechuga orejona fueron: longitud de hoja (cm), peso de biomasa fresca y seca (g), área foliar (cm²) y lecturas SPAD. También se determinó la concentración nutrimental foliar y se correlacionaron con las variables de crecimiento. El BCA 7 % generó un incremento de 87.01 % en el peso de biomasa fresca, 20.84 % en peso de biomasa seca y 78.31 % en el área foliar en comparación al testigo. Por otra parte, el BACA en general promovió el crecimiento de las plantas, ya que presentó los mayores valores en todas las variables de crecimiento comparadas con el testigo. En los dos biocarbones evaluados hubo correlaciones negativas entre las variables de crecimiento y la concentración foliar. El BCA se puede utilizar al 7 % como medio de crecimiento en plantas, mientras que, el BACA se puede usar hasta en 21 % mezclado con suelo, puesto que promovió el crecimiento e incrementó en 163.92 % el peso de la biomasa fresca en plantas de lechuga orejona.

Palabras clave: biocarbón, biomasa fresca, carbonización hidrotérmica; concentración foliar.

Rice husk and sugarcane apices biochars in the growth apricot lettuce (*Lactuca sativa* var. *Longifolia*)

Summary

Biochar is a porous solid material that can be made from agricultural residues using thermochemical techniques and its application in the soil could improve the growth of horticultural species. The objective of the present investigation was to evaluate the effect of two biochars on the growth of apricot lettuce (*Lactuca sativa* var. *Longifolia*) cv. Tinajero grown in a greenhouse. The rice husk (RHB) and sugarcane apice (SAB) biochars were produced by hydrothermal carbonization at 200 °C. The treatments were doses of the biochar: 0 (control), 7, 14 and 21 % by volume of each biochar mixed with soil with a sandy loam texture. The growth variables evaluated in apricot lettuce plants were: leaf length (cm), weight of fresh and dry biomass (g), leaf area (cm²) and SPAD readings. The foliar nutrient concentration was also determined and correlated with the growth variables. The RHB 7 % generated an increase of 87.01 % in the weight of fresh biomass, 20.84 % in weight of dry biomass and 78.31 % in leaf area compared to the control. On the other hand, SAB in general promoted the growth of the plants, since it presented the highest values in all the growth variables compared to the control. In the two biochars evaluated there were negative correlations between growth variables and foliar concentration. RHB can be used at 7 % as a growth medium in plants, while SAB can be used up to 21 % mixed with soil, since it promoted growth and increased by 163.92 % the weight of fresh biomass in plants of apricot lettuce.

Key words: biochar; fresh biomass, hydrothermal carbonization, foliar concentration.

Introducción

El biocarbón es un material sólido poroso obtenido por la degradación térmica de la biomasa vegetal principalmente de residuos agrícolas y forestales (Conte *et al.* 2021; Midelanis, 2019). El biocarbón tiene varias aplicaciones, desde la generación de energía hasta su uso como mejorador de suelos (Weber y Quicker, 2018). En este sentido, la adición del biocarbón al suelo es una práctica que se ha estado utilizando

como enmienda para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Yoo *et al.* 2021; He *et al.* 2020; Wacal *et al.* 2019). Es importante conocer las características físicas y químicas del biocarbón ya que estas características permiten explicar los efectos sobre las funciones del suelo. Al respecto, Medina y Medina (2018) mencionan que la materia prima, técnica utilizada en la elaboración del biocarbón, temperatura, presión del reactor, entre otros factores influyen en la cantidad y disponibilidad nutrimental de los biocarbones.

Yoo *et al.* (2021) señalan que se han realizado varios estudios sobre el uso del biocarbón como enmienda al suelo, donde se han evidenciado efectos positivos en las propiedades físicas y químicas del suelo. Wacal *et al.* (2019) mencionan que el uso de biocarbones de cascarilla de arroz usado como enmienda al suelo disminuyó la densidad aparente del suelo de 1.09 g cm^{-3} a 0.76 g cm^{-3} , mientras que la porosidad incrementó de 52 a 66 % en el primer ciclo de cultivo de ajonjolí (*Sesamum indicum*). Estos mismos autores mencionan que el biocarbón aplicado al suelo aumentó el pH, CE, relación C/N, K intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico en comparación con el tratamiento control. Por su parte, Escalante-Rebolledo *et al.* (2016) indican que, entre otras propiedades del biocarbón, la alta porosidad, la elevada capacidad de retención de humedad, así como la baja densidad, influyen en las propiedades físicas del suelo al mejorar las siguientes características: textura, estructura, distribución de tamaño de partículas, área superficial, densidad aparente, porosidad, capacidad de retención de humedad, capacidad de intercambio catiónico y retención de nutrientes; por consiguiente, se favorece el desarrollo y crecimiento de las plantas. Asimismo, Blanco-Canqui (2017) argumenta que, en general, el biocarbón reduce la densidad aparente del suelo entre 3 y 31 %, y que aumenta su porosidad entre 14 y 64 %.

Se ha reportado que el biocarbón influye de manera positiva en el crecimiento desarrollo y de varias especies: lechuga (*Lactuca sativa*) var. crispa, *Miscanthus lutarioriparius*, avena forrajera (*Avena sativa* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris*), cacahuate (*Arachis hypogaea*) y banano (*Musa AAA*), al aumentar la altura de plantas, producción

de biomasa fresca, materia seca de raíz y tallo, número de vainas y rendimiento (He *et al.* 2020; Concilco *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2015; Pérez-Salas *et al.*, 2013). Recientemente, Yoo *et al.* (2021) reportaron que el biocarbón de malta cervecera elaborado mediante pirólisis a 500 °C con una tasa de aplicación del 5 % mezclado con suelo, aumentó el crecimiento de plantas de lechuga var. crispa cv. Jeockchima, expresado en un incremento en peso fresco del brote y raíz, peso seco del brote y raíz, longitud de hoja, ancho de hoja y peso de hoja.

Por otra parte, el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una de las hortalizas de mayor comercialización y consumo en el mundo (Paterlini *et al.* 2019). En México, el cultivo de lechuga se siembra en 21 entidades federativas con una superficie de siembra de 22,284.4 ha. En el 2020, se reportó una superficie cosechada de 22,269.9 ha con una producción de 528,508.67 t (SIAP, 2021). Sin embargo, son escasos los estudios para evaluar el efecto del biocarbón en el crecimiento de lechuga orejona. Por ello, el objetivo del presente estudio fue evaluar los efectos del biocarbón de cascarilla de arroz y biocarbón de ápices de caña de azúcar en el crecimiento de lechuga orejona cv. Tinajero cultivada en invernadero.

Materiales y métodos

Elaboración de biocarbones y establecimiento de los experimentos

Los biocarbones de cascarilla de arroz (BCA) y ápices de caña de azúcar (BACA) se elaboraron con la técnica de carbonización hidrotérmica (*HTC*; por sus siglas en inglés) a 200 °C durante 19 h, según la metodología descrita por Velázquez-Maldonado *et al.* (2019) y por Pérez-Cabrera *et al.* (2021). Se llevaron a cabo dos experimentos en un invernadero del campo experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.

Tratamientos

En el experimento 1 los tratamientos fueron mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz (BCA) y en el experimento 2 se evaluaron mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA). Los tratamientos fueron dosis de biocarbón mezclados con

suelo y se designaron: 0 % (testigo), BCA 7 %, BCA 14 %, BCA 21 % para el biocarbón de cascarilla de arroz, mientras que para el biocarbón de ápices de caña de azúcar fueron 0 % (testigo), BACA 7%, BACA 14% y BACA 21%, para las mezclas al 7, 14 y 21 % de volumen. La textura del suelo utilizado en los experimentos fue franco arenoso (arena 66 %, arcilla 14 % y limo 20 %). Antes de realizar las mezclas con los biocarbones, el suelo se cribó con abertura de malla de 1.41 mm para eliminar piedras y residuos vegetales. Se determinó la concentración nutrimental del suelo y de los biocarbones para conocer la concentración nutrimental de los materiales empleados como medios de crecimiento (Cuadro 1).

Para ambos experimentos, el trasplante se realizó el 14 de septiembre del 2018, con plántulas de lechuga orejona cv. Tinajero que tenían cuatro hojas verdaderas se colocaron en macetas de polietileno rígido de 2 L de capacidad que contenían los tratamientos de biocarbones. Los riegos se proporcionaron de acuerdo con el requerimiento del cultivo y se aplicó la solución nutritiva de Steiner a 25 % de concentración durante el ciclo de cultivo.

Cuadro 1. Concentración nutrimental del suelo, biocarbón de cascarilla de arroz (BCA) y biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA).

	Suelo	BCA	BACA
N total (%)	0.20	0.78	2.50
P disponible (mg kg ⁻¹)	12.30	53.00	105.00
K disponible (mg kg ⁻¹)	92.90	2166.50	1611.00
Ca disponible (mg kg ⁻¹)	1528.30	1739.50	860.00
Mg disponible (mg kg ⁻¹)	245.30	447.00	5981.50
pH	6.97	5.22	4.46
CE (dS m ⁻¹)	0.50	0.14	0.47
MO (%)	1.10	nd	nd
CIC (mEq/100 g)	9.30	nd	nd
Saturación (%)	12.50	nd	nd

nd= no determinado; CE= conductividad eléctrica; MO= materia orgánica; CIC= capacidad de intercambio catiónico.

Variables evaluadas

A los 74 días después del trasplante (ddt) se midió: longitud de hoja, desde la base del tallo hasta el ápice, con regla graduada en cm; peso de biomasa fresca, las hojas de la planta sin la raíz se pesaron en una báscula OHAUS® con sensibilidad de 0.01 g. El área foliar (cm²), se midió con un medidor de área foliar LI-COR® Modelo LI-3100C. El peso de biomasa seca se determinó con la biomasa fresca secada en una estufa de aire circulante Luzeren® Modelo Pro1002498 a 70 °C hasta peso constante. El contenido relativo de clorofila (lecturas SPAD) se determinó con un medidor portátil de clorofila SPAD 502 Plus, Minolta®, en hojas completamente extendidas y recientemente maduras.

Concentración nutrimental foliar

El muestreo para el análisis químico foliar se realizó a los 74 ddt. Se determinó N total con el método micro Kjeldahl; P se determinó por la metodología de amarillo vanadato molibdato en un espectrofotómetro UV-Visible Thermo Fisher Scientific modelo Genesys 20®; Ca y Mg se determinaron en un espectrofotómetro Varian modelo SpectrAA-50®, y K se determinó en un flamómetro Sherwood modelo 410® (Alcántar-González y Sandoval-Villa, 1999)

Diseño experimental y análisis estadístico

Para cada experimento se utilizó un diseño experimental completamente al azar con seis repeticiones, la unidad experimental fue una maceta que contenía una planta de lechuga. Se realizó un análisis de varianza y cuando hubo diferencias estadísticas significativas se realizó una prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Asimismo, para cada experimento se correlacionaron las variables de crecimiento y concentración nutrimental foliar con el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.1 (Castillo, 2016).

Resultados

Primer experimento

Crecimiento de plantas

Las plantas de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en los tratamientos presentaron diferencias ($P \leq 0.05$). La mezcla de biocarbón de cascarilla de arroz al 7 % (BCA 7%), el testigo y la mezcla de biocarbón de cascarilla de arroz al 14 % (BCA 14%) tuvieron los mayores valores con 20.55, 19.25 y 19.05 cm, respectivamente (Cuadro 2). El menor crecimiento de la longitud de hoja se obtuvo con la dosis más alta de biocarbón (BCA 21%), con longitud de hoja de 15.68 cm. En peso de biomasa fresca hubo diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos (Figura 1). El tratamiento BCA 7% utilizado como medio de crecimiento fue el mejor al obtener el mayor peso de biomasa fresca con 79.20 g, es decir, aumentó en 87.01 % la biomasa fresca con respecto al testigo quien obtuvo 42.35 g de materia fresca. En general, se observó una disminución en el peso fresco con las mezclas de BCA al 14 y 21 %.

Cuadro 2. Longitud de hoja, peso de biomasa seca, área foliar y SPAD de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz (BCA) a los 74 días después de trasplante.

Tratamientos	Longitud de hoja (cm)	Peso de biomasa seca (g)	Área foliar (cm ²)	Lecturas SPAD
Testigo	19.25 a*	13.63 b	795.28 bc	39.05 a
BCA 7%	20.55 a	16.47 a	1418.08 a	40.60 a
BCA 14%	19.05 ab	15.48 ab	969.18 b	40.83 a
BCA 21%	15.68 b	12.95 b	665.14 c	36.77 a
DMS	3.52	2.8	267.37	4.43

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DMS = diferencia mínima significativa.

En peso de biomasa seca, en los tratamientos BCA 7% y BCA 14% no hubo diferencias estadísticas. Este misma respuesta se observó en plantas de lechuga orejona con los

tratamientos BCA 14% y BCA 21%, los cuales no presentaron diferencias estadísticas respecto al testigo; es decir, BCA 7% fue el tratamiento óptimo para producir biomasa seca en esta especie (Cuadro 2).

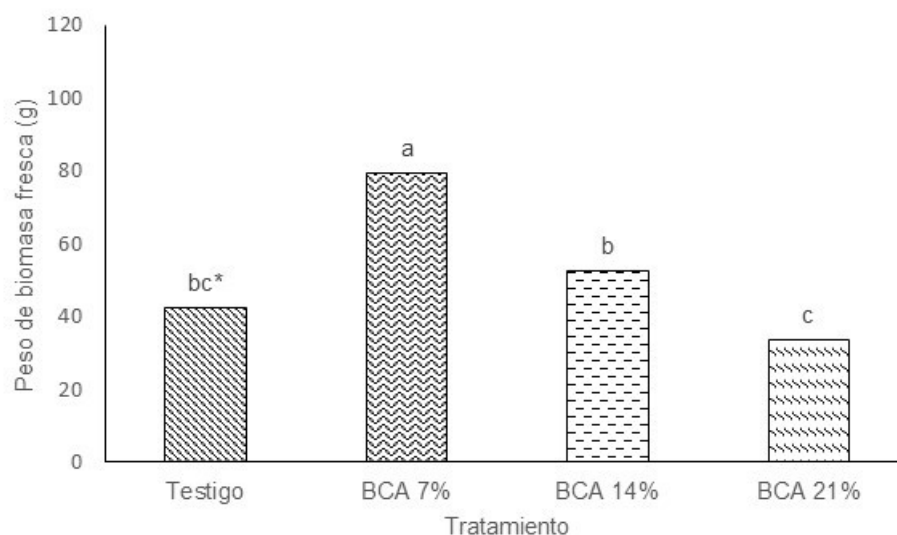


Figura 1. Peso de biomasa fresca de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz (BCA) a los 74 días después de trasplante. *= indica diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

En área foliar hubo diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos. El tratamiento BCA 7% utilizado como medio de crecimiento generó la mayor área foliar con 1418.08 cm², y fue superior en 78.31 % en comparación con el testigo quien tuvo un área foliar de 795.28 cm² (Cuadro 2). Mientras que, el tratamiento BCA 14% estadísticamente fue igual al testigo, este mismo comportamiento se observó con el tratamiento BCA 21% respecto al testigo. No hubo diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos para las lecturas SPAD (Cuadro 2), cuyos valores oscilaron de 36.77 a 40.83.

En resumen, se observó que las plantas cultivadas en la mezcla de BCA 7% tuvieron el mayor crecimiento, expresado en mayor longitud de hoja, biomasa fresca y seca, y área foliar; sin embargo, al incrementar las dosis de BCA al 14 y 21 % se redujo el crecimiento de las plantas.

Concentración nutrimental foliar

Los elementos N, Ca y Mg se encontraron en mayor concentración en las hojas de las plantas cultivadas en el testigo (Cuadro 3). Se observó que la menor concentración de N y Mg se encontró en el tratamiento BCA 7%, el cual fue el tratamiento que presentó los valores más altos en las variables de crecimiento evaluadas (Cuadro 2 y Figura 1). Para P hubo diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos, sin embargo, el testigo y BCA 21% fueron iguales ($P \leq 0.05$) con valores de 3.21 y 3.01 g kg⁻¹ respectivamente. En K los tratamientos BCA 14% y BCA 21% fueron estadísticamente iguales al testigo, los cuales presentaron valores similares que oscilaron de 37.03 a 38.36 g kg⁻¹. La menor concentración de K se obtuvo con el tratamiento BCA 7% con 34.54 g kg⁻¹.

En general, las plantas cultivadas en el tratamiento BCA 7% presentaron baja concentración de los nutrimentos en las hojas efecto lo que pudo deberse al efecto de dilución, es decir, las plantas con mayor longitud de hoja, peso de biomasa fresco y seco, así como área foliar, tuvieron los valores más bajos de concentración nutrimental en el presente estudio.

Cuadro 3. Concentración nutrimental foliar de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz (BCA).

Tratamientos	N	P	K	Ca	Mg
	g kg ⁻¹				
Testigo	35.28 a*	3.21 a	38.36 a	9.20 a	9.35 a
BCA 7%	20.74 b	2.48 b	34.54 b	7.64 b	6.23 c
BCA 14%	25.81 b	2.43 b	37.03 ab	7.57 b	6.41 bc
BCA 21%	25.24 b	3.01 a	37.43 ab	6.47 c	7.12 b
DMS	9.37	0.36	2.95	0.9	0.88

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); DMS= diferencia mínima significativa.

Análisis de correlación

Se analizaron las correlaciones entre las variables de crecimiento y la concentración nutrimental foliar en plantas cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz con suelo (Cuadro 4). Se detectaron correlaciones negativas ($P \leq 0.01$) entre N-PBS, P-PBS, P-AF, K-PBF y K-AF. También se observó que el tratamiento BCA 7% tuvo valores bajos en la concentración nutrimental foliar; no obstante, ese tratamiento propició el mayor crecimiento de las plantas al presentar los valores más altos en las variables de crecimiento. Asimismo, hubo correlaciones negativas ($P \leq 0.05$) entre N-AF, P-PBF, K-PBS y Mg-PBS.

Cuadro 4. Matriz de correlación de Pearson entre las variables de crecimiento y concentración nutrimental foliar de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz.

	LH	PBF	PBS	AF	SPAD	N	P	K	Ca	Mg
LH	1	0.58*	0.71**	0.69**	0.62*	-0.36ns	-0.49ns	-0.45ns	0.42ns	-0.06ns
PBF		1	0.73**	0.93**	0.35ns	-0.39ns	-0.59*	-0.78**	0.16ns	-0.41ns
PBS			1	0.81**	0.47ns	-0.78**	-0.83**	-0.63*	-0.23ns	-0.68*
AF				1	0.51*	-0.63*	-0.68**	-0.80**	0.02ns	-0.48ns
SPAD					1	-0.39ns	-0.48ns	-0.29ns	0.09ns	-0.24ns
N						1	0.72**	0.68*	0.62*	0.82**
P							1	0.67*	0.27ns	0.81**
K								1	0.27ns	0.65*
Ca									1	0.69*
Mg										1

*= significativo a $P \leq 0.05$; **= significativo a $P \leq 0.01$; LH= longitud de hoja; PBF= peso de biomasa fresca; PBS= peso de biomasa seca; AF= área foliar.

Segundo experimento

Crecimiento de plantas

Las plantas cultivadas en los tratamientos con biocarbón de ápices de caña de azúcar: BACA 7%, BACA 14% y BACA 21% fueron iguales ($P \leq 0.05$) para las variables longitud de hoja, peso de biomasa seco y área foliar (Cuadro 5), con excepción del peso fresco (Figura 2) y SPAD (Cuadro 5). El peso de biomasa fresca presentó diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos (Figura 2). El tratamiento BACA 21% utilizado como medio de crecimiento obtuvo la mayor materia fresca de hojas con 111.77 g, es decir, incrementó en 163.92 % el peso fresco comparado con el testigo. Asimismo, se observó que los tratamientos con biocarbón BACA 7% y BACA 14% estadísticamente fueron iguales ($P \leq 0.05$), mientras que el testigo presentó el menor peso biomasa fresca con 42.35 g. En general, se observó que la longitud de hoja, el peso de biomasa seca y fresca, así como el área foliar aumentó al incrementar las dosis de biocarbón de ápices de caña de azúcar, es decir, los tratamientos de biocarbón utilizados como medios de crecimiento promovieron un mejor crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que puede atribuirse a la aportación nutrimental del biocarbón de ápices de caña de azúcar.

Cuadro 5. Longitud de hoja, peso de biomasa seca, área foliar y SPAD de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) a los 74 días después de trasplante.

Tratamientos	Longitud de hoja (cm)	Peso de		Lecturas SPAD
		biomasa seca (g)	Área foliar (cm ²)	
Testigo	19.25 b*	13.63 b	795.30 b	39.05 b
BACA 7%	20.25 ab	18.43 a	1540.30 a	44.13 a
BACA 14%	20.48 ab	19.03 a	1567.90 a	38.22 b
BACA 21%	22.98 a	20.07 a	1922.70 a	39.84 ab
DMS	3.36	1.98	384.24	4.3

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); DMS= diferencia mínima significativa.

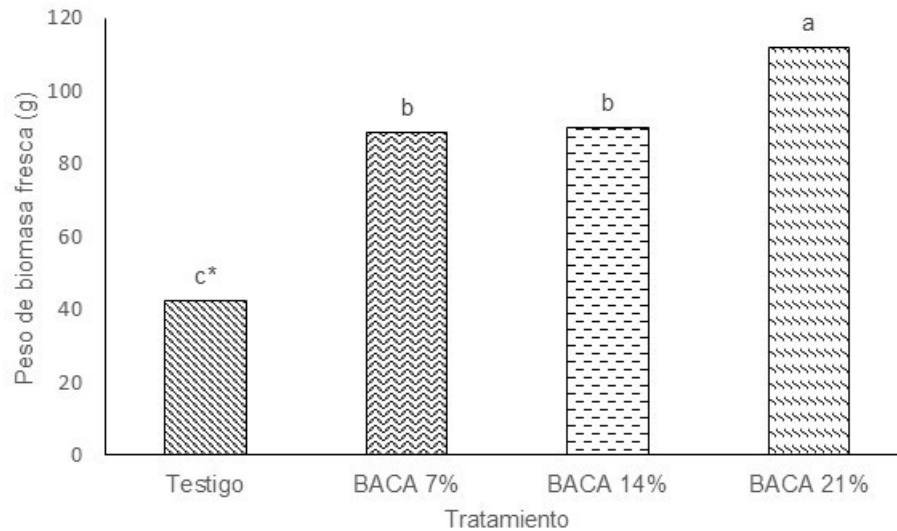


Figura 2. Peso de biomasa fresca de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) a los 74 días después de trasplante. *= indica diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Respecto a las lecturas SPAD no hubo diferencias ($P \leq 0.05$) en los tratamientos BACA 7% y BACA 21%, misma tendencia se observó BACA 14% y BACA 21% que fueron iguales ($P \leq 0.05$) al testigo, pero, los tratamientos BACA 7% y BACA 21% tuvieron el mayor contenido relativo de clorofila con 44.13 y 39.84 unidades SPAD (Cuadro 5), al presentar concentraciones de N de 40.43 y 30.14 g kg⁻¹, respectivamente (Cuadro 6), lo cual está con el color verde de las plantas.

En resumen, la adición de dosis crecientes de biocarbón de ápices de caña de azúcar promovió el crecimiento de las plantas de lechuga orejona, es decir, se observó que al aumentar los porcentajes de biocarbón mezclados con suelo, hubo un incremento en el crecimiento de las plantas.

Concentración nutrimental foliar

En el análisis foliar no hubo diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos para N, P, Ca y Mg (Cuadro 6). En la concentración de K los tratamientos BACA 7% y BACA 14% estadísticamente fueron iguales ($P \leq 0.05$) al testigo, pero, diferentes al tratamiento

BACA 21% que presentó la menor cantidad de K en las hojas de las plantas con 31.84 g kg⁻¹.

La concentración nutrimental foliar en las plantas cultivadas en los tratamientos de BACA fueron similares al tratamiento testigo ($P \leq 0.05$), con excepción del K que tuvo un valor menor en el tratamiento BACA 21%. Sin embargo, los medios de crecimiento con biocarbón de ápices de caña de azúcar promovieron el crecimiento de las plantas, estos resultados se pueden deber al contenido nutrimental del biocarbón y a sus propiedades químicas como pH y CE (Cuadro 1).

Cuadro 6. Concentración nutrimental foliar de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA).

Tratamientos	N	P	K	Ca	Mg
	-----g kg ⁻¹ -----				
Testigo	35.28 a*	3.21 a	38.36 a	9.20 a	9.35 a
BACA 7%	40.43 a	3.15 a	36.49 a	6.82 a	8.36 a
BACA 14%	29.16 a	3.32 a	35.79 a	7.25 a	7.57 a
BACA 21%	30.14 a	3.43 a	31.84 b	5.50 a	8.37 a
DMS	22.38	0.38	3.63	3.98	2.04

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); DMS= diferencia mínima significativa.

Análisis de correlación

Se correlacionaron las variables de crecimiento y concentración nutrimental foliar en plantas cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar con suelo (Cuadro 7). Existió correlación negativa ($P \leq 0.01$) entre K-PBF y K-AF. Las plantas con menor concentración de K presentaron el mayor crecimiento aéreo, es decir, el BACA propició las condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas y promovió el desarrollo de hojas más largas y grandes. También, se detectaron correlaciones negativas ($P \leq 0.05$) entre K-LH, K-PBS, Ca-PBF, Ca-PBS, Ca-AF, Mg-PBF y Mg-PBS.

Cuadro 7. Matriz de correlación (Pearson) entre las variables de crecimiento y concentración nutrimental foliar de lechuga orejona cv. Tinajero cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar.

	LH	PBF	PBS	AF	SPAD	N	P	K	Ca	Mg
LH	1	0.58*	0.64**	0.71**	0.23ns	-0.56ns	0.12ns	-0.64*	-0.40ns	-0.25ns
PBF		1	0.94**	0.93**	0.11ns	-0.32ns	0.34ns	-0.71**	-0.67*	-0.58*
PBS			1	0.94**	0.22ns	-0.37ns	0.22ns	-0.67*	-0.65*	-0.61*
AF				1	0.19ns	-0.33ns	0.27ns	-0.77**	-0.70*	-0.49ns
SPAD					1	0.20 ns	-0.39ns	-0.01ns	-0.12ns	-0.05ns
N						1	-0.26ns	0.35ns	0.21ns	0.20ns
P							1	-0.63*	-0.52ns	0.13ns
K								1	0.72**	0.04ns
Ca									1	-0.10ns
Mg										1

*= significativo a $P \leq 0.05$; **= significativo a $P \leq 0.01$; LH= longitud de hoja; PBF= peso de biomasa fresca; PBS= peso de biomasa seca; AF= área foliar; SPAD= lecturas SPAD.

Discusión

Crecimiento de plantas de lechuga orejona

El biocarbón se ha utilizado como enmienda en diferentes tipos de suelos y se ha observado efectos positivos en el crecimiento de diversas plantas. En la presente investigación, el tratamiento BCA 7% utilizado como medio de crecimiento en plantas de lechuga orejona cv. Tinajero fue el mejor tratamiento, lo que permitió el mejor crecimiento de las plantas. En este contexto, Velázquez-Machuca *et al.* (2019) mencionan que el biocarbón contiene una alta superficie específica, porosidad y retención de humedad, además, de contener materia orgánica y nutrientes disponibles para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, se observó que al aumentar la dosis de biocarbón de cascarilla de arroz al 14 y 21 % afectó negativamente el crecimiento de las plantas. Estos resultados pueden deberse a la baja densidad aparente y alta porosidad total del suelo, producidas por la adición del

biocarbón al suelo; propiedades que no siempre son benéficas para las plantas (Blanco-Canqui, 2017).

Yoo *et al.* (2021) en plantas de lechuga cultivadas en biocarbón de malta cervecera elaborado a 300°C, reportaron una disminución en el peso fresco del brote, peso fresco de la raíz, peso seco del brote, número de hojas, longitud de hojas, ancho de hoja y peso por hoja al aumentar la dosis del biocarbón de 2 al 5 %. Asimismo, Lee *et al.* (2018) reportaron que al aumentar la dosis de biocarbón de 2 a 5 %, el peso fresco y seco de brote, peso fresco y seco de la raíz, número de hojas, longitud de hojas y ancho de hojas del cultivo de col china (*Brassica chinensis*) presentó una disminución con el aumento de la dosis de biocarbón de ramas podadas.

Por otro lado, el BACA 7%, el BACA 14% y el BACA 21% utilizados como medios de crecimiento para las plantas presentaron un mayor crecimiento comparado con el tratamiento testigo. Se observó una tendencia en el aumento del crecimiento de las plantas al incrementar las dosis de biocarbón de ápices de caña de azúcar del 7 al 21 %. Esta respuesta es similar a los resultados de Carter *et al.* (2013) que reportaron un aumento de 259 hasta 658 % de biomasa aérea de lechuga al aumentar la dosis de biocarbón de 25 a 150 g kg⁻¹ más fertilización, en comparación el tratamiento suelo más fertilización sin biocarbón. En este sentido, Moreno-Riascos y Ghneim-Herrera (2020) mencionan que el biocarbón mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y tiene un efecto positivo en el crecimiento de las plantas.

Por su parte, Zhang *et al.* (2020) indican que las propiedades físicas y químicas del biocarbón están influenciadas por la técnica termoquímica, tiempo y temperatura de reacción, y la composición de la materia prima. En la presente investigación los dos biocarbones evaluados se elaboraron mediante la técnica de carbonización hidrotérmica a 200 °C; pero provienen de diferentes materias primas, por lo tanto, la composición de los materiales utilizados, así como su concentración nutrimental de los biocarbones influyó en los resultados obtenidos. De acuerdo con Moreno-Riascos y Ghneim-Herrera (2020), indican que los efectos positivos del biocarbón están

determinados principalmente por factores como: origen de la materia prima, técnica de carbonización, frecuencia y dosis de aplicaciones.

Taiz *et al.* (2014) reportan que el rango óptimo del pH del suelo oscila de 5.5 a 6.5 para favorecer el crecimiento de las raíces; asimismo, estos autores mencionan que el pH ligeramente ácido aumenta la solubilidad de los nutrientes lo que facilita la disponibilidad para las plantas. Los dos biocarbones producidos por carbonización hidrotérmica con ácido cítrico al 10 % tuvieron pH ácido (5.22 y 4.46 para BCA y BACA, respectivamente) lo cual pudo influir en la disponibilidad de los nutrimentos para el desarrollo de las plantas al corregir el pH del suelo. Además, Silva *et al.* (2016) indican que la presencia de cenizas en el biocarbón aumenta el pH y capacidad de intercambio catiónico, debido a que las cenizas del biocarbón son ricas en óxidos e hidróxidos de metales alcalinos que se disuelven fácilmente y reaccionan muy rápido con el suelo, por consiguiente, se aumenta el pH del suelo y, además, se liberan nutrimentos como K, Ca, Mg, entre otros iones presentes en el suelo que son esenciales para el crecimiento de las plantas. Cuenca-Rivera *et al.* (2019) indican que la aplicación de biocarbón como enmienda al suelo tiene efectos positivos sobre el pH, conductividad eléctrica y materia orgánica a los 30 y 60 días de su aplicación. Asimismo, Silva *et al.* (2017) concluyeron que los biocarbones elaborados con cascarilla de arroz, aserrín y silo de sorgo tuvieron un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo de frijol.

Concentración nutrimental foliar

El análisis químico foliar mostró que las plantas cultivadas en el biocarbón de ápices de caña de azúcar presentaron valores similares en concentración nutrimental en comparación a las cultivadas en el tratamiento testigo. Es importante mencionar que tanto en el BCA como en el BACA no se observaron plantas con deficiencias nutrimentales. Es probable que para las plantas de lechuga las propiedades físicas del biocarbón hayan sido más relevantes para generar mejores condiciones de crecimiento que las propiedades químicas del mismo, por lo que sería conveniente evaluar también las propiedades físicas del biocarbón, ya que estas no pueden modificarse una vez establecido el cultivo (Gayosso-Rodríguez *et al.*, 2018). En este

sentido, Gayosso-Rodríguez *et al.* (2021) mencionan que las propiedades físicas de los medios de crecimiento están relacionadas directamente con la cantidad de agua, aire y nutrimentos disponibles para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La concentración foliar de nutrimentos en las plantas de lechuga orejona cultivadas en los tratamientos con BCA y BACA utilizados como medios de crecimientos se encontraron dentro del intervalo de suficiencia con la excepción de Mg que está en valores superiores a los de suficiencia (Alcántar-González y Trejo-Téllez, 2012). En contraste, Silva *et al.* (2016) reportaron concentraciones elevadas de N, P, K, Ca, Mg y S en granos de frijol con el aumento de las dosis de biocarbones, lo que indica que el biocarbón aumenta la disponibilidad de nutrientes al mejorar la calidad del suelo para el crecimiento de las plantas. Estos mismos autores concluyeron que las aplicaciones de biocarbones al suelo mejoraron la calidad del mismo y, en consecuencia, aumenta el rendimiento y la acumulación nutrimental en granos de frijol.

Es importante señalar que es necesario realizar más investigaciones sobre los efectos del biocarbón de cascarilla de arroz y ápices de caña de azúcar aplicados como enmienda al suelo en otros cultivos hortícolas.

Conclusiones

El biocarbón de cascarilla de arroz al 7 % mezclado con suelo incrementó un 87.01 % la biomasa fresca, 20.84 % la biomasa seca y 78.31 % el área foliar por lo que se puede utilizar como medio de crecimiento en plantas de lechuga orejona cv. Tinajero.

El biocarbón de ápices de caña de azúcar se puede aplicar hasta en 21 % en mezcla con suelo como medio de crecimiento en plantas, ya que esta dosis favoreció el mayor crecimiento de las plantas y además, se obtuvo un incremento de 163.92 % en la biomasa fresca de lechuga orejona.

Literatura citada

- Alcántar-González G. y Sandoval-Villa, M. (1999). Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de Muestreo, Preparación, Análisis e Interpretación. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 155 p.
- Alcántar-González, G. y Trejo-Téllez, L. I. (2012). Nutrición de cultivos. Colegio de postgraduados. Texcoco, Estado de México. 454 p.
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4): 687-711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- Carter, S.; Shackley, S.; Sohi, S.; Suy, T. B. and Haefele, S. (2013). The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and Cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy*. 3: 404-418.
- Castillo, M. L. E. (2016). Introducción al SAS* para Windows (3ra ed.). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México. 295 p.
- Conte, P.; Bertani, R.; Sgarbossa, P.; Bambina, P.; Schmidt, H. P.; Raga, R.; Lo Papa, G.; Chillura-Matino, D. F.; Lo Meo, P. (2021). Recent developments in understanding biochar's physical-chemistry. *Agronomy*, 11, 615.
- Concilco, A. E.; Moreno-Reséndez, A.; García-Carrillo, M.; Quiroga-Garza, H. M. y García, O.A. (2018). Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera. *Terra Latinoamericana*. 36: 221-228. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.375>
- Cuenca-Rivera, J. A.; Quevedo-Guerrero, J. N. y García-Batista, R. M. (2019). Evaluación de la mineralización de biochar sobre parámetros químicos del suelo en dos tiempos de incubación. *Revista Científica Agroecosistemas*. 7(3): 6-11.
- Escalante-Rebolledo, A.; Pérez-López, G.; Hidalgo-Moreno, C.; López-Collado, J.; Campos-Alves, J.; Valtierra-Pacheco, E. y Etchevers-Barra, J.D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*. 34: 367-382.
- Gayosso-Rodríguez, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M.A., & Garruña, R. (2018a). Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia*. 52(4): 639-652.

- Gayosso-Rodríguez, S.; Gutiérrez-Castorena, M. C.; Estrada-Botello, M. A. y Sánchez-Hernández, R. (2021). Características micromorfológicas de sustratos orgánicos y su relación con retención de agua y crecimiento radical. *Agrociencia*. 55: 195-208. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2413>
- He, K.; He, G.; Wang, C.; Zhang, H.; Xu, Y.; Wang, S.; Kong, Y.; Zhou, G.; Hu, R. (2020). Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* Growth in a coastal saline-alkali soil. *Applied Soil Ecology*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103674>
- Lee, J. H.; Seong, C. J.; Kang, S. S.; Lee, H. C.; Kim, S. H.; Lim, J. S.; Kim, J. H.; Yoo, J. H.; Park, J. H. and Oh, T. K. (2018). Effect of different types of biochar on the growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). *Korean Journal of Agricultural Science*. 45(2): 197-203. <https://doi.org/10.7744/KJOAS.20180033>
- Middelanis, T. (2019). El biocarbón aplicado al suelo retiene agua y nutrientes en los valles interandinos del Departamento de Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova*. 9(3). 429-449.
- Medina, O. L. E. y Medina, O.I.N. (2018). Prototipo autotérmico móvil para la producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoamericana*, 36, 121-129. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>
- Moreno-Riascos, S. y Ghneim-Herrera, T. (2020). Impacto f biochar use on agricultural production and climate change. *Agronomía Colombiana*. 38(3): 425-439. doi: 10.15446/agron.colomb.v38n3.87398
- Paterlini, H.; González, M. V. y Picone, L. I. (2019). Producción de lechuga en un suelo con aplicación de compost de cama de pollo. *Cienc. Suelo*. 37(1): 38-50.
- Pérez-Cabrera, C. A.; Juárez-López, P.; Anzaldo-Hernández, J.; Alia-Tejacal, I.; Salcedo-Pérez, E.; Guillén-Sánchez, D.; Balois-Morales, R.; López-Martínez, V. y Castro-Brindis, R. (2021). Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y la adición de catalizadores orgánicos. *Terra Latinoamericana*. 39(1): 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.936>
- Pérez-Salas, R. A.; Tapia-Fernández, A. C.; Soto, G. y Benjamin, T. (2013). Efecto del Bio-carbón sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* y el desarrollo de plantas

- de banano (*Musa AAA*). InterSedes: Revista Electronica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica. 14: 66-100.
- SIAP [Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera] (2021). Producción anual agrícola. Consultada el 04 de mayo de 2021. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Silva, I. C. B.; Fernandes, L. A.; Colen, F. and Sampaio, R. A. (2017). Growth and production of common bean fertilized with biochar. *Ciência Rural*. 47: 1-8.
- Silva, I. C. B.; Basílio, J. J. N.; Fernandes, L. A.; Colen, F.; Sampaio, R. A. and Frazão, L. A. (2016). Biochar from different residues on soil properties and common bean production. *Scientia Agricola*. 7: 378-382.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M. and Murphy, A. (2014). Plant physiology & Development. Sixth edition. Sinauer Associates, Sunderland. MA, USA. 756 p.
- Velázquez-Machuca, M.A., Equihua-Soriano, J.R., Venegas-González, J., Montañez-Soto, J.L., Pimentel-Equihua, J.L., Muñoz-Navia, M. (2019). Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. *Terra Latinoamericana*, 37: 243-251. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.409>
- Velázquez-Maldonado, J.; Juárez-López, P.; Anzaldo-Hernández, J.; Alejo-Santiago, G.; Valdez-Aguilar, L.A.; Alia-Tejacal, I.; López-Martínez, V.; Pérez-Arias, G.A. y Guillén-Sánchez, D. (2019). Concentración nutrimental de biocarbón de cascarilla de arroz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42: 129-136.
- Yoo, J. H.; Luyima, D.; Lee, J. H.; Park, S. Y.; Yang, J. W.; An, J. Y., Yun, Y. U. and Oh, T. K. (2021). Effects of brewer's spent grain biochar on the growth and quality of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Crispa). *Appl Biol Chem*. 64: 10. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00577-z>
- Xu, C. Y.; Hosseini, B. S.; Hao, Y.; Rachaputi, R. C. N.; Xu, Z. and Wallace, H. M. (2015). Peanut shell biochar improves soil properties and peanut kernel quality on a red Ferrosol. *Journal of Soils and Sediments*. 15: 2220-2231.
- Wacal, C., Ogata, N., Basalirwa, D., Handa, T., Sasagawa, D., Acidri, R., ... & Nishihara, E. (2019). Growth, seed yield, mineral nutrients and soil properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) as influenced by biochar addition on upland field converted from paddy. *Agronomy*, 9, 55. doi:10.3390/agronomy9020055

Weber, K. and Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*. 217: 240-261.

Zhang, Y. F.; Dai, J. M.; Guo, H.; Shi, S.; Yan, Z. F. y Hou, W. S. (2020). Acomparative study of carbon microsphere preparation by the hydrothermal carbonization of waste cotton fibers, viscose fibers and avicel. *New Carbon Materials*. 35(3): 286-294. doi: 10.1016/S1872-5805(20)60490-5

CAPITULO IV

Biocarbones de ápices de caña de azúcar en el crecimiento de albahaca tailandesa (*Ocimum basilicum* var. *Thyrsiflora*) cultivada en invernadero

Resumen

El biocarbón es material sólido y poroso producido a partir de diversas materias primas como cascarillas, rastrojos, residuos forestales, estiércoles, entre otros residuos, y que aplicado al suelo puede mejorar el crecimiento de cultivos agrícolas. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) en el crecimiento de albahaca tailandesa (*Ocimum basilicum* var. *Thyrsiflora*) cultivada en invernadero. El BACA se elaboró mediante carbonización hidrotérmica a 200 °C. Los tratamientos fueron mezclas de biocarbón al 0 (testigo), 7, 14, 21 y 28 % volumen con suelo de textura franco-arenoso. Se utilizó albahaca, las variables de crecimiento evaluadas fueron altura de planta, peso de biomasa fresca y seca, área foliar y SPAD. Además, se determinó la concentración nutrimental foliar. El diseño experimental fue completamente al azar. El mejor tratamiento fue el BACA 7% que incrementó 45.13 % el peso de biomasa fresca, 35.20 % el peso de biomasa seca y 54.47 % el área foliar. Las plantas cultivadas en el tratamiento BACA 21% presentaron la mayor concentración foliar de N, P y Ca. El biocarbón de ápices de caña de azúcar se puede utilizar como medio de crecimiento en 7 % mezclado con suelo, ya que promovió el crecimiento de las plantas de albahaca tailandesa.

Palabras clave: biocarbón, carbonización hidrotérmica, concentración foliar, *Ocimum basilicum*.

Sugarcane apices biochar on the growth of thai basil (*Ocimum basilicum* var. *Thyrsiflora* L.) grown in a greenhouse

Summary

Biochar is a solid and porous material produced from various raw materials such as husks, stubble, forest residues, manure, among other residues, and that applied to the

soil can improve the growth of agricultural crops. The objective of the present study was to evaluate the effect of sugarcane apice biochar (SAB) on the growth of thai basil (*Ocimum basilicum* var. *thyrsiflora*) grown in a greenhouse. SAB was made by hydrothermal carbonization at 200 °C. The treatments were mixtures of biochar at 0 (control), 7, 14, 21 and 28 % volume with soil loamy-sandy texture. Basil was used, the growth variables evaluated were plant height, weight of fresh and dry biomass, leaf area and SPAD. In addition, the foliar nutrient concentration was determined. The experimental design was completely randomized. The best treatment was SAB 7%, which increased the weight on fresh biomass by 45.13 %, 35.20 % the weight of dry biomass and 54.47 % the leaf area. The plants grown in the SAB 21% treatment presented the highest foliar concentration of N, P and Ca. The biochar from sugarcane apices can be used as a growth medium up to 7 % mixed with soil, since it promoted the growth of the thai basil plants.

Keys words: biochar, hydrothermal carbonization, foliar concentration, *Ocimum basilicum*.

Introducción

Dentro de las propuestas sustentables en el sector agrícola, se busca que la agricultura sea más amigable con el medio ambiente, mediante alternativas para el mejoramiento de los suelos, los cuales debido a su uso intensivo se han degradado y han perdido fertilidad. Algunas prácticas que se realizan para mejorar la fertilidad del suelo son: la incorporación de compostas, residuos de cosechas, pajas, cascarillas y biocarbón (Orozco-Gutiérrez y Lira-Fuentes, 2020). El biocarbón es un material sólido poroso rico en carbono obtenido por la conversión termoquímica principalmente de biomasa vegetal en un ambiente limitado de oxígeno (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020).

Se ha reportado que la incorporación de biocarbón como enmienda al suelo mejora la capacidad de retención de agua, disminuye la densidad aparente, regula el pH e incrementa el contenido de materia orgánica, además, facilita el laboreo del suelo y mejora su estructura (Sánchez-Pilcorema *et al.*, 2020, Escalante-Rebolledo *et al.*,

2016). En general, la adición de biocarbón al suelo, mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos degradados, por consiguiente, aumenta la calidad de los suelos e incrementa la productividad de los cultivos (Orozco-Gutiérrez y Lira-Fuentes, 2020).

Los efectos del biocarbón sobre el crecimiento en plantas dependen principalmente de la materia prima del biocarbón, técnica de elaboración, temperatura y presión del reactor, así como la especie del cultivo. Liu *et al.* (2020) reportan que en el cultivo de soya (*Glycine max* L.) aplicaciones de 5 % de biocarbón de paja de maíz elaborado con la técnica de pirolisis a 450 °C durante 2 h, aumentó 5.5 % la altura de planta, 13.4 % el número de vainas, 11.0 % el rendimiento de semilla y 8.0 % el peso de biomasa seca, en comparación con el tratamiento testigo (sin biocarbón). Videgain-Marco *et al.* (2020) en plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) cultivadas en suelo franco arenoso con aplicaciones del 3 % de biocarbón de brotes de uva (*Vitis vinifera* L.) producido mediante la técnica de pirolisis a 400 °C reportaron aumento de 52 % en peso de raíces secas comparado con el testigo. Por su parte, Manolikaki y Diamadapoulus (2019) en plantas de maíz (*Zea mays* L.) cultivadas en dos tipos de suelo, reportaron en suelo franco arenoso con enmiendas de biocarbón de residuos de uva al 2 % un aumento de 155 % en peso de biomasa seca, mientras que, en suelo franco con la mezcla de biocarbón de cascarilla de arroz al 2 % más compost al 2 % el aumento fue de 436 % en la misma variable, en comparación con el testigo.

La albahaca es una planta herbácea aromática y medicinal de crecimiento rápido, con un amplio rango de tolerancia ambiental, además, es una de las hierbas aromáticas más populares, con una amplia gama de usos (Ramírez-Aragón *et al.*, 2019; Atiphasaworn *et al.*, 2017). Khan *et al.* (2017) mencionan que la albahaca tailandesa es una planta medicinal por sus compuestos bioactivos con efectos antioxidantes benéficos para la salud humana. En México, en el año 2020 se produjeron 3,103.4 t de albahaca, que generó un valor de producción equivalente a \$ 2.391.530,00 dólares estadounidenses (SIAP, 2020). Sin embargo, no existen estudios de biocarbón en el cultivo de albahaca tailandesa. Por ello, el objetivo del presente estudio fue evaluar los

efectos de biocarbones de ápices de caña de azúcar en el crecimiento en plantas de albahaca tailandesa.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en un invernadero del campo experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. El biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) se elaboró con la técnica de carbonización hidrotérmica (*HTC*, por sus siglas en inglés) a 200 °C, durante 19 h según la metodología descrita por Velázquez-Maldonado *et al.* (2019) y por Pérez-Cabrera *et al.* (2021).

Tratamientos

Los tratamientos fueron mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar con suelo (volumen/volumen) con la siguiente nomenclatura: BACA 7%, BACA 14%, BACA 21% y BACA 28% (Cuadro 1). Como testigo se utilizó suelo sin biocarbón. La textura del suelo empleado fue de textura franco arenoso, con pH de 6.97 y CE de 0.50 dS m⁻¹. La concentración nutrimental disponible del suelo y los biocarbones se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) con suelo.

Clasificación	Descripción
Testigo	Suelo
BACA 7%	93 % de suelo + 7 % biocarbón de ápices de caña de azúcar
BACA 14%	86 % de suelo + 14 % biocarbón de ápices de caña de azúcar
BACA 21%	79 % de suelo + 21 % biocarbón de ápices de caña de azúcar
BACA 28%	72 % de suelo + 28 % biocarbón de ápices de caña de azúcar

Siembra y trasplante

Las semillas de albahaca tailandesa se sembraron en charolas de germinación de poliestireno de 200 cavidades, cada cavidad tenía capacidad de 20.5 mL. El experimento inició el día del trasplante, 21 de febrero de 2020, con plántulas que tenían cuatro hojas verdaderas que se colocaron en macetas de polietileno rígido de 2 L de capacidad. A partir del trasplante, se aplicaron riegos con solución nutritiva de Steiner a concentración de 25 % con fines de mantenimiento del cultivo, según requerimiento hídrico del cultivo.

Cuadro 2. Concentración nutrimental extraíble y N total del suelo y biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA).

Nutrientes	Suelo	BACA
N (%)	0.2	2.5
P (mg kg ⁻¹)	12.3	105.0
K (mg kg ⁻¹)	92.9	1611.0
Ca (mg kg ⁻¹)	1528.3	860.0
Mg (mg kg ⁻¹)	245.3	5981.5

Variables de crecimiento

Las variables se evaluaron 33 días después del trasplante (ddt): altura de planta, se determinó desde la base del tallo hasta el ápice, con una regla graduada en cm; peso de biomasa fresca, se pesaron tallo y hojas en una báscula OHAUS[®] con una precisión de 0.01 g. El peso de biomasa seca se determinó con la biomasa fresca cosechada secadas en una estufa de aire circulante Luzeren[®], Modelo Pro1002498 a 70 °C hasta peso constante. El área foliar se midió en el momento de la cosecha con un medidor de área foliar LI-COR[®] Modelo LI-3100C expresado en cm². También se cuantificó el contenido relativo de clorofila (lecturas SPAD), con un medidor portátil de clorofila SPAD 502 Plus, Minolta[®], en hojas verdaderas recientemente maduras y completamente extendidas.

Concentración nutrimental foliar

El muestreo para el análisis químico foliar se realizó a los 33 ddt. Se determinó N total con el método micro Kjeldahl, P se determinó por la metodología de amarillo vanadato molibdato en un espectrofotómetro UV-Visible Thermo Fisher Scientific modelo Genesys 20[®]. Ca y Mg se determinaron en un espectrofotómetro Varian modelo SpectrAA-50[®]. K se determinó en un flamómetro Sherwood modelo 410[®] (Alcántar-González y Sandoval-Villa, 1999).

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente al azar con ocho repeticiones. La unidad experimental fue una maceta que contenía una planta. Se realizó un análisis de varianza y cuando hubo diferencias estadísticas significativas se realizó una comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) con el programa *Statistical Analysis Software* (SAS) versión 9.1 (Castillo, 2016).

Resultados y discusión

Crecimiento de albahaca tailandesa

En altura de planta no hubo diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos (Cuadro 3). Albuquerque-Méndez *et al.* (2013) mencionan que no encontraron diferencias

estadísticas en el crecimiento de girasol (*Helianthus annuus* L. variedad SH-25) con las aplicaciones de biocarbones de astilla de pino (*Pinus* sp) y de restos de podas de olivo (*Oleo europaea*), lo cual puede deberse a la propia naturaleza del tipo de biocarbón, rico en carbono, pero relativamente pobre en nutrimentos. Sin embargo, Pérez-Salas *et al.* (2013) aplicaron biocarbón de madera de melina (*Gmelina arborea*) en banano (*Musa* AAA) y reportaron un incremento de 104 % en altura de planta en comparación con el testigo, a los 101 días después del trasplante. Esto concuerda con lo reportado por Parra-González *et al.* (2019) quienes indican que la materia prima del biocarbón influye sobre el contenido nutrimental del mismo.

Cuadro 3. Altura, peso de biomasa seca, área foliar y SPAD de albahaca tailandesa cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) a los 33 días después de trasplante.

Tratamientos	Altura (cm)	Peso de biomasa seca (g)	Área foliar (cm ²)	SPAD
Testigo	17.88 a*	1.79 b	132.77 b	38.48 a
BACA 7%	18.38 a	2.42 a	205.09 a	39.22 a
BACA 14%	17.54 a	2.20 ab	139.22 b	39.36 a
BACA 21%	17.53 a	1.98 ab	145.26 b	42.20 a
BACA 28%	17.18 a	2.03 ab	152.36 b	40.12 a
DMS	2.82	0.45	44.64	5.58
CV	8.17	11.16	14.75	7.20

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); DMS= diferencia mínima significativa. CV= coeficiente de variación.

En el peso de biomasa fresca hubo diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos (Figura 1). El mejor tratamiento como medio de crecimiento fue el BACA 7% ya que produjo el mayor peso de biomasa fresca con 17.88 g, que representa un incremento de 45.13 % comparado con el testigo, el cual presentó el valor más bajo con 12.32 g, mientras que, los tratamientos BACA 14%, BACA 21% y BACA 28% fueron iguales ($P \leq 0.05$). Esta

misma tendencia se observó con los tratamientos BACA 21% y BACA 28% respecto al testigo. En este sentido, Silva *et al.* (2017) al evaluar diferentes biocarbones a partir de cascarilla de arroz a 10 %, aserrín 7 % y sorgo ensilado 7 % en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*), reportaron que los biocarbones promovieron el crecimiento de las plantas de frijol al generar mayor número de vainas, número de granos, por tanto, mayor producción de materia seca en grano de frijol. Por su parte, Tenesaca-Martínez *et al.* (2020) en el cultivo de banano (*Musa x paradisiaca* L.) clon Williams reportaron que las aplicaciones de biocarbón en dosis de 50 y 75 g más fertilización química (10 g de Yaramila Complex) por planta fueron las dosis adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas comparadas con el tratamiento control, mientras que dosis de 100 g de biocarbón retardó el crecimiento de las plantas.

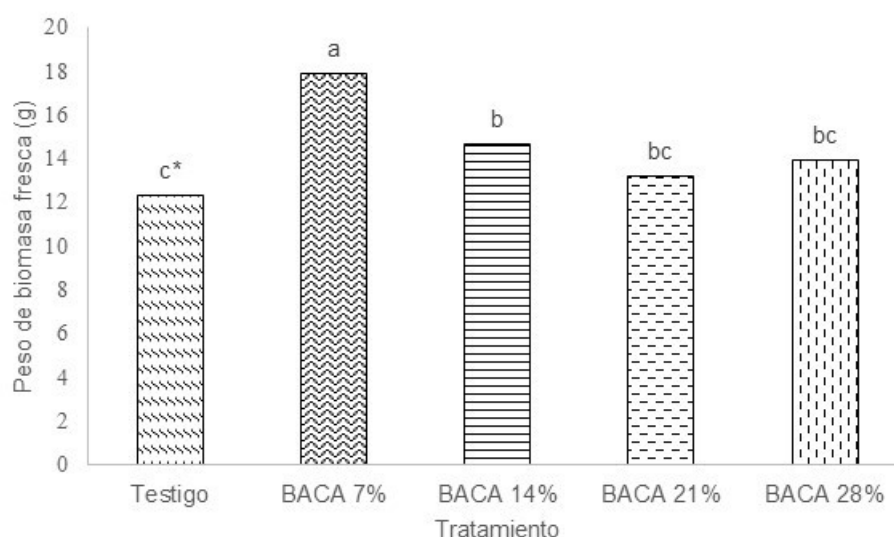


Figura 1. Peso de biomasa fresca de albahaca tailandesa cultivada en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA) a los 33 días después de trasplante. *indica diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Respecto al peso de biomasa seca en las plantas cultivadas en el BACA 7%, BACA 14%, BACA 21% y BACA 28% fueron iguales ($P \leq 0.05$). Asimismo, se observa que los tratamientos BACA 14%, BACA 21% y BACA 28% estadísticamente son iguales al testigo. El tratamiento BACA 7% presentó el mayor valor obtenido para la producción

de materia seca, es decir, incrementó 35.20 % el peso de materia seca respecto al testigo quien obtuvo el menor valor con 1.79 g por planta (Cuadro 3). En general, el peso de biomasa seca de las plantas cultivadas en las mezclas de biocarbón estuvieron por encima de los valores obtenidos por el testigo. Al respecto, Albuquerque-Méndez *et al.* (2013) indican que el biocarbón tiene efectos positivos sobre el crecimiento de las plantas, además, señala que podría utilizarse como reservorio de carbono en suelos agrícolas. No obstante, Carter *et al.* (2013) mencionan que es necesario realizar investigaciones a mediano y largo plazo.

En cuanto al área foliar, se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos (Cuadro 3). Las plantas cultivadas en el tratamiento BACA 7% tuvieron mayor área foliar con 205.09 cm², mientras que la menor área foliar se obtuvo en el testigo con 132.77 cm², es decir, la dosis de 7 % de biocarbón de ápices de caña de azúcar generó un aumento un 54.47 % en el área foliar comparado con el testigo. En general, las plantas crecidas en las mezclas de biocarbón tuvieron mayor área foliar que las que se cultivaron en suelo sin biocarbón. Sánchez-Reinoso *et al.* (2020) mencionan que la aplicación de biocarbón como enmienda al suelo mejora las características físico-químicas, incluyendo la fertilidad. Esto puede deberse a la interacción biocarbón-suelo que favorece el crecimiento y rendimiento de los cultivos. No hubo diferencias ($P \leq 0.05$) en las lecturas SPAD en las plantas de albahaca en las condiciones del presente estudio. Las lecturas SPAD en los medios de crecimiento con biocarbón oscilaron entre 39.22 a 42.20 (Cuadro 3).

Concentración nutrimental foliar

El análisis foliar presentó diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos para N, P y Ca (Cuadro 4). La mayor concentración nutrimental de N, P y Ca en las hojas se encontraron en el tratamiento BACA 21% con 44.33, 9.55 y 12.61 g kg⁻¹ respectivamente. Para el K y Mg no hubo diferencias entre los tratamientos. Sin embargo, no existe una tendencia clara sobre la acumulación nutrimental y la dosis del biocarbón mezclado al suelo. En general, el N, P, Ca y Mg en los tratamientos con biocarbón de ápices de caña de azúcar tuvieron valores por encima del testigo a

excepción del K. Estos resultados pueden deberse al contenido nutrimental del biocarbón (Cuadro 2). Al respecto, Medina y Medina (2018) mencionan que la cantidad y dinámica de la liberación nutrimental de los biocarbones depende principalmente del tipo de biomasa, técnica empleada en su elaboración, así como la temperatura de conversión.

Cuadro 4. Concentración nutrimental foliar de albahaca tailandesa cultivadas en mezclas de biocarbón de ápices de caña de azúcar (BACA).

Tratamientos	N	P	K	Ca	Mg
	-----g kg ⁻¹ -----				
Testigo	30.43 c*	6.60 c	72.27 a	8.61 c	3.76 a
BACA 7%	37.97 abc	7.89 bc	80.00 a	11.09 abc	4.22 a
BACA 14%	40.34 ab	8.77ab	86.80 a	11.40 ab	4.10 a
BACA 21%	44.33 a	9.55 a	98.97 a	12.61 a	3.94 a
BACA 28%	35.66 bc	8.45 ab	71.94 a	9.38 bc	4.47 a
DMS	8	1.54	27.58	2.64	1.11
CV	7.88	6.95	12.52	9.24	10.09

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); DMS= diferencia mínima significativa. CV= coeficiente de variación.

Es conveniente realizar más investigaciones en otras plantas aromáticas para maximizar los beneficios del biocarbón como mejorador de suelos, asimismo, es importante considerar varios aspectos tales como la materia prima, dosis de aplicación, así como tipos de suelos y cultivos.

Conclusiones

El biocarbón de ápices de caña de azúcar al 7 % utilizado como medio de crecimiento mejoró el crecimiento de plantas de albahaca tailandesa, expresado en incremento de 45.1 % en el peso fresco, 35.2 % en el peso de biomasa seca y 54.47 % en el área foliar.

Literatura citada

- Albuquerque-Méndez, J. A., J. M. Calero-Rodríguez, V. Barrón-López de la Torre, J. Torrent-Castellet, M. C. del Campillo-García, A. Gallardo-Correa y R. Villar-Montero. (2013). El biocarbón como una herramienta para limitar las emisiones de CO₂ y mejorar las propiedades del suelo en el ámbito Mediterráneo. 6° Congreso Forestal Español. (Ed), Sociedad Española de Ciencias Forestales. ISBN: 978-84-937964-9-5. Obtenido de <https://www.congresoforestal.es/actas/doc/6CFE/6CFE01-549.pdf>
- Alcántar-González G. y Sandoval-Villa, M. (1999). Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de Muestreo, Preparación, Análisis e Interpretación. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 155 p.
- Atiphasaworn, P., S. Monggoot, E. Gentekaki, S. Brooks y P. Pripdeevech. (2017). Antibacterial and antioxidant constituents of extracts of endophytic fungi isolated from *Ocimum basilicum* var. *Thyrsiflora* Leaves. *Curr. Microbiol.* 74(10): 1185-1193. doi: 10.1007/s00284-017-1303-1
- Carter, S., S. Shackley, S. Sohi, T. Boun-Suy y 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: 404-418.
- Escalante-Rebolledo, A., G. Pérez-López, C. Hidalgo-Moreno, J. López-Collado, J. Campos-Alves, E. Valtierra-Pacheco y J. D. Etchevers-Barra. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana.* 34(3): 367-382. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57346617009>
- Khan, T., B. H. Abbasi, M. S. Afridi, F. Tanveer, I. Ullah, S. Bashir y C. Hano. (2017). Melatonin-enhanced biosynthesis of antimicrobial AgNPs by improving the phytochemical reducing potential of a callus culture of *Ocimum basilicum* L. var. *Thyrsiflora*. *Avances del RSC.* 7: 38699-38713. doi: 10.1039/c7ra05044e
- Liu, D., Z. Feng, H. Zhu, L. Yu, K. Yang, S. Yu, Y. Zhang y W. Guo. (2020). Effects of corn straw biochar application on soybean growth and alkaline soil properties. *BioResources.* 15(1): 1463-1481.

- Manolikaki, I. y E. Diamadopoulos. (2019). Positive effects of biochar and biochar-compost on maize growth and nutrient availability in two agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 50(5): 512-526. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566468>
- Medina, O. L. E. y O. I. N. Medina. (2018). Prototipo autotérmico móvil para la producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoamericana*. 36: 121-129. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>
- Nazir, S., H. Jan, D. Tungmunnithum, S. Drouet, M. Zia, C. Hano y B. H. Abbasi. (2020). Callus Culture of Thai Basil is an effective biological system for the production of antioxidants. *Molécules*. 25: 4859. doi: 10.3390/molecules25204859
- Orozco-Gutiérrez, G. y R. C. Lira-Fuentes. (2020). Elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos proveniente de las podas de bambú (*Guadua angustifolia*). *Revista Mexicana de Agroecosistemas*. 7(1): 1-9.
- Pérez-Cabrera, C. A.; Juárez-López, P.; Anzaldo-Hernández, J.; Alía-Tejacal, I.; Salcedo-Pérez, E.; Guillén-Sánchez, D.; Balois-Morales, R.; López-Martínez, V. y Castro-Brindis, R. (2021). Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y la adición de catalizadores orgánicos. *Terra Latinoamericana*. 39(1): 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.936>
- Pérez-Salas, R., A. C. Tapia-Fernández, G. Soto y T. Benjamin. (2013). Efecto del bio-carbón sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* y el desarrollo de plantas de banano (*Musa AAA*). *InterSedes: Revista Electrónica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica*. 14(27): 66-100. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66627452004>
- Ramírez-Aragón, M. G., V. J. Borroel-García, L. Salas-Pérez, J. D. López-Martínez, M. A. Gallegos-Robles y H. I. Trejo-Escareño. (2019). Ácido rosmarínico, fenoles totales y capacidad antioxidante en tres variedades de *Ocimum basilicum* L. con diferentes dosis de potasio. *Polibotanica*. 47: 89-98. doi: 10.18387/polibotanica

- Sánchez-Pilcorema, S., A. Condoy-Gorotiza, P. Sisalima-Morales, S. Barrezueta-Unda, y E. Jaramillo-Aguilar. (2020). Uso de biocarbones en medios de cultivo para el crecimiento de *Trichoderma spp.* In vitro. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas. 3(2): 66-72
- Sánchez-Reinoso, A. D., E. A. Ávila-Pedraza y H. Restrepo-Díaz. (2020). Use of biochar in agriculture. Acta Biológica Colombiana. 25(2): 327-338. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n2.79466>
- SIAP [Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca]. (2020). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (consulta del 10/11/2020)
- Silva, I. C. B., L. Arnaldo-Fernandes, F. Colen y R. Arruda-Sampaio. (2017). Growth and production of common bean fertilized with biochar. Ciência Rural. 47(11): 1-8. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33153222002>
- Tenesaca-Martínez, S., J. N. Quevedo-Guerrero y R. García-Batista. (2019). Determinación de la dosis óptima de biocarbón como enmienda edáfica en el cultivo de banano (*Musa X Paradisiaca* L.) Clon Williams. Revista Científica Agroecosistemas. 7(3): 134-141. Recuperado de <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>.
- Videgain-Marco, M., P. Marco-Montori, C. Martí-Dalmau, M. C. Jaizme-Vega, J. J. Manyà-Cervelló y F. J. García-Ramos. (2020). Effects of biochar application in a sorghum crop under greenhouse conditions: growth parameters and physicochemical fertility. Agronomy. 10(1): 1-17. doi:10.3390/agronomy10010104

CAPITULO V

Biocarbón de cascarilla de arroz como sustrato en el crecimiento de plántulas de pepino

Resumen

El biocarbón es un material rico en carbono derivado de residuos vegetales y que se obtiene mediante técnicas termoquímicas en un ambiente limitado de oxígeno o en ausencia de éste. El objetivo fue evaluar las propiedades físicas de mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz como componente de sustrato y su efecto en el crecimiento de plántulas de pepino. Los tratamientos fueron: biocarbón de cascarilla de arroz (BC) y turba comercial (T; Sunshine mix 3), así como mezclas de ambos en diferentes proporciones (20:80, 40:60, 60:40 y 80:20 %, respectivamente). Para la caracterización física se evaluó: granulometría, la densidad aparente, la porosidad total, la porosidad de aireación y la porosidad de humedad. Adicionalmente, se determinó la concentración nutrimental. Para evaluar el efecto del biocarbón en el crecimiento de plántulas de pepino se consideró la longitud de tallo, el peso fresco de biomasa aérea y de raíz, el área foliar, el peso seco de biomasa aérea y de raíz, y el contenido relativo de clorofila (lecturas SPAD). Se encontró que la adición hasta 40 % de BC al medio de crecimiento universal (turba), no altera las propiedades físicas de porosidad total, porosidad de aireación y porosidad de retención de humedad; además, el crecimiento de plántulas de pepino en mezcla de BC al 20 % es similar en longitud de tallo, biomasa fresca, biomasa seca y área foliar a las plántulas cultivadas en 100 % turba.

Palabras clave: *Cucumis sativus*; carbonización hidrotérmica; medios de crecimiento; propiedades físicas y químicas; cultivo sin suelo.

Rice husk biochar as a substrate for growth of cucumber seedlings

Summary

Biochar is a carbon-rich material derived from plant residues and obtained by thermochemical techniques in an oxygen-limited environment or in the absence of it. The aim was to evaluate the physical properties of mixtures of rice husk biochar as a substrate component and their effect on the growth of cucumber seedlings. The treatments were: rice husk biochar (RHB) and commercial peat moss (CPM; Sunshine mix 3), as well as mixtures of both in different proportions (20:80, 40:60, 60:40 and 80:20 %, respectively). For physical characterization, particle size, bulk density, total porosity, aeration porosity and water-holding porosity were evaluated. Additionally, the nutritional concentration was determined. To evaluate the effect of biochar on cucumber seedlings growth, stem length, fresh weight of aerial and root biomass, leaf area, dry weight of aerial and root biomass, and relative chlorophyll content (SPAD readings) were considered. It was found that the addition of up to 40 % of RHB to the universal growth medium (peat moss) does not alter the physical properties of total porosity, aeration porosity and water-holding porosity; furthermore, the growth of cucumber seedlings in 20 % RHB mixture is similar in stem length, fresh biomass, dry biomass and leaf area to seedlings grown with 100% peat moss.

Key words: *Cucumis sativus*; hydrothermal carbonization; growing media; physical and chemical properties; soilless culture.

Introducción

El biocarbón es un material rico en carbono derivado de residuos vegetales, el cual se obtiene mediante técnicas termoquímicas en un ambiente limitado de oxígeno o en ausencia de éste (Huang and Gu, 2019; Velázquez-Maldonado *et al.*, 2019). Dicho material se genera principalmente con el fin de obtener beneficios como enmienda al suelo (Sánchez-Pilcorema *et al.*, 2020; Medina y Medina, 2017), aumento en la productividad de cultivos (Iftikhar *et al.*, 2018; Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016), mejora la tasa de colonización de hongos micorrízicos e incremento en la actividad microbiana (Singh *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2016). Asimismo, se ha reportado el uso de biocarbón

en la producción de plántulas (Iglesias-Abad *et al.*, 2020) y en la producción de cultivos en contenedor (Huang and Gu, 2019; Guo *et al.*, 2018; Blok *et al.*, 2017).

Varios estudios reportan que las características físicas y químicas del biocarbón dependen principalmente de la materia prima, técnica empleada, intervalo de calentamiento, temperatura y presión del reactor (Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016). Por lo tanto, es importante caracterizar las propiedades físicas y químicas del biocarbón, con la finalidad de explicar sus efectos al utilizarlo como enmienda al suelo o como alternativa para disminuir el uso de turba como sustrato.

Se ha comprobado que el biocarbón actúa como un mejorador potencial tanto del suelo como de los sustratos, ya que su adición afecta positivamente algunas propiedades físicas y químicas. En este sentido, Mathias-Schlegel *et al.* (2018) y Albuquerque *et al.* (2014) reportan que el biocarbón reduce la densidad aparente e incrementa la porosidad total y la capacidad de retención de agua del suelo (Wacal *et al.*, 2019; Blanco-Canqui, 2017), y de los sustratos (Blok *et al.*, 2017), lo que favorece el desarrollo y crecimiento de las plántulas. Las interacciones entre propiedades físicas y químicas determinan la fertilidad del sustrato o medio de crecimiento. Dichas interacciones pueden ser modificadas con la adición del biocarbón y favorecer el crecimiento de las plantas (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020).

Una de las principales funciones de los sustratos o medios de crecimiento utilizados en la producción de plántulas es proveer de soporte físico, así como proporcionar un balance adecuado de aire, agua y nutrimentos para el apropiado crecimiento de las raíces (Pire y Pereira, 2003). Las características físicas (como porosidad de aireación y capacidad de retención de humedad) y químicas (pH, capacidad de intercambio catiónico y concentración de nutrimentos) de un sustrato influyen en crecimiento y funcionamiento de las raíces, por lo que pueden afectar de manera positiva o negativa la calidad de plántulas (García *et al.*, 2001). En México, no hay investigaciones sobre el efecto del biocarbón en la producción de plántulas de especies hortícolas. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar las propiedades físicas de mezclas de biocarbón

de cascarilla de arroz (BC) como componente de sustrato y su efecto en el crecimiento de plántulas de pepino.

Materiales y métodos

El trabajo de investigación se dividió en dos etapas: 1) etapa de laboratorio, la cual consistió en la caracterización física del BC, la turba y la mezcla de ambos materiales, así como la evaluación de la concentración nutrimental de los materiales individuales (BC y turba), y 2), etapa de invernadero, en la cual se evaluaron los materiales individuales y mezclas de ellos en el crecimiento de plántulas de pepino.

Elaboración de biocarbón

Para elaborar el BC se utilizó cascarilla de arroz obtenida de un molino comercial de Cuautla, Morelos, de la cosecha primavera-verano de 2019. La técnica empleada para su elaboración fue la de carbonización hidrotérmica (HTC, por sus siglas en inglés) a 200 °C con ácido cítrico al 10 % como catalizador (Velázquez-Maldonado *et al.* 2019).

Tratamientos

Los materiales individuales utilizados fueron: biocarbón de cascarilla de arroz (BC) y turba comercial (T; Sunshine mix 3), los cuales se mezclaron bajo diferentes proporciones: 20:80, 40:60, 60:40 y 80:20 % (v/v) respectivamente. Los tratamientos se designaron como: T1= turba (testigo), T2= BC, T3= mezcla 20:80 %, T4= mezcla 40:60 %, T5= mezcla 60:40 % y T6= mezcla 80:20 %.

Caracterización física

Granulometría. En una tamizadora eléctrica (MONTINOX®), con tamices número: 8, 10, 12, 16, 20 y 50 (2.38, 1.68, 1.41, 1.15, 0.86 y 0.24 mm de abertura, respectivamente), se colocó una muestra compuesta de 800 cm³ de cada tratamiento durante tres minutos; posteriormente, se pesó el material retenido en cada tamiz y se calculó el porcentaje por tamaño de partícula.

Densidad aparente (DA). Se utilizaron permeámetros de poliestireno con capacidad de 232 mL. Las muestras se saturaron con agua corriente por 24 horas, se colocaron en los permeámetros y se secaron en una estufa a 65 °C hasta peso constante (Gayosso-Rodríguez *et al.* 2018b).

La porosidad total (PT), porosidad de aireación (PA) y la porosidad de retención de humedad (PRH) se determinaron mediante el procedimiento descrito por Landis *et al.* (1990).

Concentración nutrimental

A los materiales individuales (biocarbón y turba) se les determinó N con el método micro Kjeldahl y P con amarillo de molibdato vanato. El contenido total de K, Ca y Na se obtuvo mediante la técnica de flamometría y el Mg total por espectrofotometría de absorción atómica, según la norma oficial mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2000).

Crecimiento de plántulas

El experimento se desarrolló en junio de 2019 un invernadero tipo túnel de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, ubicada en Cuernavaca, Morelos, México (18° 58' 51" N, 99° 13' 55" O, altitud de 1,866 m.s.n.m.). La temperatura y la humedad relativa se monitorearon con un registrador de datos ambientales (U12, Hobo®). La temperatura promedio del invernadero fue 28.5 °C y humedad relativa promedio de 65 %. Los tratamientos se evaluaron en plántulas de pepino tipo americano 'Thunderbird' (Seminis®) en charolas de germinación de poliestireno de 200 cavidades, con capacidad de 20.5 mL. Las plántulas se regaron con agua purificada por ósmosis inversa.

A los 23 días después de la siembra, se midió la longitud de tallo (LT), el peso fresco de biomasa aérea (PFBA), el peso fresco de biomasa de raíz (PFBR), el área foliar (AF), el peso seco de biomasa aérea (PSBA), el peso seco de biomasa de raíz (PSBR) y el contenido relativo de clorofila. El PFBA y PSBR se midieron con una báscula

(OHAUS®), y el AF con un medidor de área foliar (LI-3100C, LI-COR®. Lincoln, EUA). Para el PSBA y el PSBR se utilizó una estufa de aire circulante (Pro1002498, Luzeren®) a 70 °C hasta peso constante, y para determinar el contenido de clorofila (lecturas SPAD) se utilizó un medidor portátil de SPAD (502 Plus, Minolta®).

Diseño experimental y análisis estadístico

En la primera etapa, se utilizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones para determinar las propiedades físicas y químicas de las mezclas de sustratos evaluados. En la segunda etapa, se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con seis repeticiones y 10 plántulas como unidad experimental. Para asegurar la normalidad, los datos expresados en porcentaje se transformaron con la raíz cuadrada del arcoseno. Con excepción de los datos de las variables de propiedades físicas de sustratos, los datos se sometieron a un análisis de varianza y, cuando hubo diferencias estadísticas, se realizó una comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Asimismo, para determinar si las propiedades físicas de los sustratos tuvieron relación con el crecimiento de las plántulas, se realizó un análisis de correlación de Pearson, con 18 número de pares de valores y se reportaron las correlaciones significativas ($P \leq 0.05$), mediante el programa *Statistical Analysis Software* (SAS Institute, 2004).

Resultados y discusión

Propiedades físicas

En relación con los porcentajes acumulados de tamaño de partículas de hasta 0.86 mm, el T3 (mezcla 20:80) presentó el mayor valor (63.31 %), mientras que el T1 (turba) tuvo el valor más bajo (41.44 %) (Cuadro 1). En tamaños de 0.86 hasta 2.38 mm, la mayor distribución de partículas se concentró en el T2 (BC) con 55.26 %, y el T3 presentó la menor distribución (32.38 %). El mayor porcentaje de partículas con tamaño superior a 2.38 mm lo tuvo el T1 (7.74 %), y el menor valor lo presentó el T2 (0.50 %). Es importante señalar que los reportes sobre granulometría de BC son escasos; sin embargo, los valores del presente estudio contrastan con los reportados por Pérez-Salas *et al.* (2013) en biocarbón de melina (*Gmelina arborea*), ya que obtuvieron una mayor distribución de partículas de 0.24 a 0.84 mm con 57 %, seguido

de 23 % de partículas mayores a 2 mm y 20 % de partículas menores a 2 mm. Lo anterior se puede deber a la composición del material vegetal empleado y al proceso de elaboración del biocarbón.

Cabrera (1999) menciona que los componentes de sustratos o mezclas deben estar compuestas por partículas con tamaños entre 0.5 a 4 mm, con un porcentaje no mayor de 20 % para tamaños de partículas ≤ 0.5 mm, ≥ 60 % en tamaños de partículas de 0.5 a 2 mm, y ≤ 20 % en tamaños de partículas mayores a 2 mm. Por su parte, Gayosso-Rodríguez *et al.* (2018a) señalan que porcentajes mayores de 20 % en partículas con tamaño ≤ 0.5 mm afectan la capacidad de aireación en los sustratos, debido a que esta disminuye con el tamaño de partícula.

En general, se observó que la distribución de partículas se vio afectada por la combinación de ambos materiales. Es decir, al disminuir la proporción de BC, los porcentajes acumulados de partículas menores a 0.86 mm y superiores a 2.38 mm aumentaron, mientras que partículas en un rango de 0.86 a 2.38 aumentaron al incrementar la proporción de BC.

Cuadro 1. Distribución granulométrica (porcentual con base a peso) en mezclas de turba (T) y biocarbón de cascarilla de arroz (BC).

Tratamientos	Tamaño de partículas (mm)					
	<0.24	0.24-0.86	0.86-1.15	1.15-1.68	1.68-2.38	>2.38
T1 (T)	7.50	33.94	19.45	21.8	9.54	7.74
T2 (BC)	7.31	36.90	20.16	30.7	4.40	0.50
T3 (BC:T, 20:80)	23.99	39.32	12.08	16.4	3.90	4.35
T4 (BC:T, 40:60)	19.62	38.26	13.31	20.5	4.39	3.88
T5 (BC:T, 60:40)	16.60	37.78	14.71	24.4	3.88	2.65
T6 (BC:T, 80:20)	11.96	34.69	16.17	30.0	5.47	1.67

La porosidad total (PT) aumentó al disminuir el contenido de BC en la mezcla. Los tratamientos T1, T3 y T4 (mezcla 40:60) fueron diferentes significativamente ($P \leq 0.05$) al resto de los tratamientos en PT y porosidad de retención de humedad (PRH) (Cuadro

2). Aunque no se observaron diferencias estadísticas entre T5 (mezcla 60:40), T6 (mezcla 80:20) y T2, este último presentó los valores más bajos de PT y PRH (76.25 y 63.23 %, respectivamente). Los resultados del presente estudio fueron más altos a los reportados por Webber *et al.* (2018) quienes en mezclas de turba (Sun Gro Horticulture) más biocarbón de bagazo de caña al 25:75, 50:50 y 75:25 % observaron que el espacio poroso osciló de 73.13 a 76.79 %, obteniendo el mayor espacio poroso con la mezcla más baja de biocarbón. Webber *et al.* (2017) mencionan que el espacio poroso osciló de 59.98 a 64.56 % con mezclas de turba (Sun Gro Horticulture) y cenizas de bagazo de caña (25:75, 50:50 y 75:25 %). Respecto a la porosidad de aireación (PA), los resultados oscilaron entre 12.87 y 15.62 % sin diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre tratamientos.

En relación con la PT en sustratos orgánicos, Morales-Maldonado y Casanova-Lugo (2015) mencionan que ésta debe ser mayor a 85 %. En este estudio, los tratamientos T3 y T4 cumplen con esta recomendación, lo cual genera un equilibrio entre la relación agua-aire (PA y PRH). Por otra parte, los tratamientos T1, T3 y T4 presentaron diferencias significativas en la PRH en comparación con T2 y T6. En este sentido, Webber *et al.* (2017) señalan que al disminuir los porcentajes de cenizas de bagazo de caña de azúcar mezclado con turba (Sun Gro Horticulture) (75:25 % turba:cenizas) se obtiene el mayor espacio poroso, saturación de agua y capacidad de campo. En contraste, Webber *et al.* (2018) reportaron que la mezcla 75:25 % de turba:biocarbón de bagazo de caña de azúcar aumentó el espacio poroso, pero disminuyó las propiedades de saturación de agua y capacidad de campo en los sustratos.

La retención del agua en un sustrato no sólo está determinada por la granulometría, sino también por el acomodo, forma y compactación de las partículas, ya que generan diferentes tipos de poros (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2011). Por ello, partículas mayores a 1 mm favorecen la formación de poros de mayor tamaño (Morales-Maldonado y Casanova-Lugo, 2015) y en este estudio la turba fue el material con mayor cantidad de partículas > 1 mm, por lo que al incrementar la proporción de turba en la mezcla también aumentó la PT. Los Poros grandes permiten el acomodo de

partículas pequeñas intra e interpartícula, lo cual genera poros de menor tamaño que contribuyen a la conservación de agua (Anicua-Sánchez *et al.*, 2009).

Cuadro 2. Propiedades físicas de la turba (T), el biocarbón de cascarilla de arroz (BC) y mezclas de ambos.

Tratamientos	PT	PA	PRH	DA
	-----%-----			g cm ⁻³
T1 (T)	87.29 a*	15.44 a	71.85 a	0.11 d
T2 (BC)	76.25 b	13.01 a	63.23 b	0.20 a
T3 (BC:T 20:80)	86.25 a	15.62 a	70.62 a	0.12 c
T4 (BC:T 40:60)	85.07 a	13.01 a	72.05 a	0.15 c
T5 (BC:T 60:40)	78.35 b	12.87a	65.48 ab	0.17 b
T6 (BC:T 80:20)	77.98 b	13.90 a	64.09 b	0.20 a
CV	1.32	7.96	1.76	4.51

CV= Coeficiente de variación. PT= porosidad total. PA= porosidad de aireación. PRH= porosidad de retención de humedad. DA= densidad aparente. T= turba. BC= biocarbón. *Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, ≤ 0.05).

La mayoría de las investigaciones relacionadas con biocarbón se enfocan en el contenido de humedad, cenizas, carbono fijo, volatilidad y área de superficie como propiedades físicas (Rodríguez *et al.*, 2019; Herrera *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2017). No obstante, Webber *et al.* (2018, 2017) reportaron propiedades físicas como porosidad total, saturación de agua y capacidad de campo en biocarbón de bagazo de caña de azúcar y cenizas de bagazo de caña de azúcar mezclado con turba (Sun Gro Horticulture) en diferentes porcentajes (0, 25, 50, 75 y 100 %).

Respecto a la densidad aparente (DA) se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos; el T2 y T6 presentaron la mayor DA con 0.20 g cm⁻³, mientras que la turba (T1) mostró el menor valor con 0.11 g cm⁻³. Pratiwi *et al.* (2016) obtuvieron resultados aproximados con 0.18 g cm⁻³ en biocarbón de cascarilla de arroz. Por otra

parte, Albuquerque *et al.* (2014) reportaron DA de 0.19, 0.25, 0.66, 0.72, y 0.74 g cm⁻³ en diferentes biocarbones elaborados a partir de paja de trigo, astillas de pino, podas de olivo, hueso de aceitunas y cáscara de almendras, respectivamente. Webber *et al.* (2018), en biocarbón de bagazo de caña de azúcar, obtuvieron una baja DA (0.11 g cm⁻³); sin embargo, la turba (Sun Gro Horticulture) presentó una DA de 0.11 g cm⁻³, igual a la encontrada en este estudio. Es importante considerar la DA, ya que, además del efecto que puede tener en el crecimiento de plantas, puede resultar en el aumento de los costos de transporte y manejo (Cabrera, 1999). Una DA baja es deseable para facilitar las labores de manipulación y transporte de las charolas de germinación (Bracho *et al.* 2009).

Concentración nutrimental

Se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$) en la concentración nutrimental de la turba y el BC en N, K, Ca, Mg y Na (Cuadro 3). Se observó que la mayor concentración de los elementos nutrimentales se encontró en la turba; con excepción del P, el cual no tuvo diferencias significativas. Estos resultados se pueden deber a la composición química de la turba, ya que esta adicionada con dolomita agrícola, que aporta Ca y Mg e incrementa la disponibilidad de nutrimentos como N, P y Ca (Calva y Espinosa, 2017).

Cuadro 3. Concentración nutrimental de la turba y el biocarbón de cascarilla de arroz.

Tratamientos	N %	P -----mg kg ⁻¹ -----	K	Ca	Mg	Na
Turba	0.93 a*	1971.53 a	12559.30 a	7541.10 a	24705.27 a	1208.89 a
Biocarbón	0.78 b	1993.23 a	3303.10 b	2218.41 b	6887.09 b	835.58 b
CV	5.56	5.84	13.18	13.63	7.50	9.13
DMS	0.11	262.64	2369.80	1508.30	2687.10	211.57

CV= coeficiente de variación. DMS= diferencia mínima significativa. *Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, ≤ 0.05).

El contenido nutrimental de BC fue superior al reportado por Velázquez-Maldonado *et al.* (2019) con valores de 0.32 % de N; 504 mg kg⁻¹ de P; 1,117 mg kg⁻¹ de K y 983 mg

kg⁻¹ de Mg, excepto en Ca (10,988 mg kg⁻¹). Aunque la cascarilla de arroz utilizada en ambos trabajos fue extraída de la misma región de Cuautla, la cosecha de esta se realizó en diferentes años, lo cual pudo haber influido en el contenido nutrimental de los biocarbones. Por otra parte, los resultados obtenidos fueron superados por los reportados por Cho *et al.* (2017): 12,050 mg kg⁻¹ de P, 15,8000 mg kg⁻¹ Ca, 10,380 mg kg⁻¹ de Mg y 7,340 mg kg⁻¹ de Na, a excepción del contenido de N y K. En este caso, el biocarbón se elaboró en un tostador de madera con un rango de temperatura de 200 a 250 °C.

Las diferencias de las concentraciones nutrimentales de los biocarbones, pudieran estar influenciadas por la técnica y temperatura utilizadas en su elaboración. Al respecto, Bethancourt *et al.* (2019) mencionan que, al aumentar la temperatura de 714 a 935 °C mediante la técnica de gasificación, la concentración nutrimental del biocarbón incrementó de 0.30 a 0.50 % en N, de 6,000 a 10,000 mg kg⁻¹ en P, de 8,000 a 10,000 mg kg⁻¹ en K y de 236.7 a 524.0 mg L⁻¹ en Mn. Por lo anterior, se puede decir que las propiedades de los biocarbones también son afectadas por las técnicas de elaboración, materias primas, intervalos de calentamientos, temperatura, presión del reactor y uso de catalizadores (Bento *et al.*, 2019, Huang and Gu, 2019, Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016).

Crecimiento de plántulas

El crecimiento de las plántulas de pepino en los tratamientos T1 y T3 fue superior ($P \leq 0.05$) al resto de los tratamientos (Cuadro 4), con un incremento de 81.65 y 84.81 % en LT, 136.61 y 119.44 % en PFBA, 106.96 y 105.90 % en AF, y 166.99 y 145.08 % en PSBA, respectivamente, comparado con las plántulas cultivadas en biocarbón de cascarilla de arroz (T2) que presentaron los valores más bajos en todas las variables evaluadas.

Cuadro 4. Efecto de la turba y biocarbón de cascarilla de arroz en el crecimiento de plántulas de pepino.

Tratamientos	LT cm	PFBA mg	AF cm ²	PSBA mg	PSBR mg	SPAD
T1 (Turba)	2.87 a*	902.67 a	9.81 a	176.67 a	40.83 ab	38.38 a
T2 (Biocarbón)	1.58 d	381.50 d	4.74 b	66.17 d	23.67 c	38.96 a
T3 (BC:turba 20:80)	2.92 a	837.17 a	9.76 a	162.17 a	51.00 a	42.38 a
T4 (BC:turba 40:60)	2.25 b	657.33 b	6.84 b	122.83 b	50.17 a	42.08 a
T5 (BC:turba 60:40)	2.15 bc	550.17 bc	6.58 b	102.00 bc	43.67 ab	41.65 a
T6 (BC:turba 80:20)	1.93 c	442.83 cd	5.66 b	85.33 cd	34.67 b	41.98 a
CV	6.26	13.41	4.18	14.91	14.35	6.76
DMS	0.25	148.04	2.31	31.22	10.25	4.85

LT= longitud de tallo. PFBA= peso fresco de biomasa aérea. AF= área foliar. PSBA= peso seco de biomasa aérea. PSBR= peso seco de biomasa de raíz. DMS=mínima significativa. CV= coeficiente de variación. *Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, ≤ 0.05).

Cho *et al.* (2017) encontraron mayor altura de plántulas, mayor peso seco de raíz, tallo y hojas en *Zelkova serrata* con el biocarbón de cascarilla de arroz al 20 % mezclado con suelo más fertilización; estos autores atribuyeron los resultados a las propiedades físicas y químicas del biocarbón. Araméndiz-Tatis *et al.* (2013) reportaron, en plántulas de berenjena, que al utilizar tres mezclas de cascarilla de arroz cruda, en diferentes combinaciones con aluvión, lombricomposta y gallinaza (50:50:0:0, 40:40:20:0 y 40:40:0:20 %, respectivamente), los tratamientos con mayor cascarilla de arroz registraron los valores más bajos en las variables de crecimiento y producción de biomasa.

En PSBR, el valor más alto se obtuvo con el tratamiento T3 (51 mg), y el valor más bajo, con el T2 (23.67 mg). Estos resultados se pueden deber a las propiedades físicas y químicas del BC (Cuadros 1, 2 y 3). Respecto a las unidades SPAD en hojas, no se encontraron diferencias significativas.

Análisis de correlación

En el Cuadro 5 se muestra el resumen de las variables con mayor asociación, en donde se detectaron correlaciones positivas ($P \leq 0.01$) entre PT-LT, PTPFBA, PT-AF, PT-PSBA, PRH-LT, PRH-PFBA, PRH-AF y PRH-PSBA. Se observó que los tratamientos T1 y T3 tuvieron mayor PT, por lo que presentaron mayor capacidad de retención de humedad y menor densidad; características que favorecieron el crecimiento y el desarrollo de las plántulas. Asimismo, se detectó una correlación positiva ($P \leq 0.05$) entre PA-PSBA.

Cuadro 5. Correlaciones de Pearson entre propiedades físicas y variables de crecimiento de plántulas de pepino.

Variables	Coeficiente de correlación (n = 18)
Porosidad total-Longitud de tallo	0.82**
Porosidad total-Peso fresco de biomasa aérea	0.83**
Porosidad total-Área foliar	0.67**
Porosidad total-Pesos seco de biomasa aérea	0.81**
Porosidad total-Peso seco de biomasa de raíz	0.56*
Porosidad de aireación-Peso fresco de biomasa aérea	0.58*
Porosidad de aireación-Peso seco de biomasa aérea	0.60**
Porosidad de retención de humedad-Longitud de tallo	0.73**
Porosidad de retención de humedad-Peso fresco de biomasa aérea	0.65**
Porosidad de retención de humedad-Área foliar	0.66**
Porosidad de retención de humedad-Peso seco de biomasa aérea	0.61**
Porosidad de retención de humedad-Peso seco de biomasa de raíz	0.58*
Densidad aparente-Longitud de tallo	-0.84**
Densidad aparente-Peso fresco de biomasa aérea	-0.90**
Densidad aparente-Área foliar	-0.84**
Densidad aparente-Peso seco de biomasa aérea	-0.91**
Densidad aparente-Pesos seco de biomasa de raíz	-0.66**

*= significativo a $P \leq 0.05$; **= significativo a $P \leq 0.01$; n = número de pares de valores en la correlación.

Por otro lado, se detectaron correlaciones negativas ($P \leq 0.01$) en DA-LT, DA-PFBA, DA-AF, DA-PSBA y DAPsBR (Cuadro 5). Los tratamientos T1 y T3 presentaron valores bajos en DA, pero exhibieron plantas con mayor LT, PFBA, PSBA y PSBR. Esto indica

que la DA de $0.20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ tiene un impacto negativo en el crecimiento y desarrollo de la planta. Al respecto, GayossoRodríguez, Borges-Gómez, Villanueva-Couoh, Estrada-Botello, y Garruña-Hernández (2016) señalan que la densidad de un sustrato es diversa, y que de ésta dependen la porosidad y el movimiento del agua.

Conclusiones

La adición de hasta 40 % de biocarbón de cascarilla de arroz al medio de crecimiento universal (turba) no altera las propiedades físicas (porosidad total, porosidad de aireación y porosidad de retención de humedad). El crecimiento de plántulas de pepino con mezcla de biocarbón al 20 % es similar en longitud de tallo, biomasa fresca, biomasa seca y área foliar con respecto a las plántulas cultivadas bajo 100 % de turba comercial; es decir, el biocarbón de cascarilla de arroz puede ser una alternativa para reemplazar, parcialmente, la turba comercial en la producción de plántulas de pepino.

Literatura citada

- Alburquerque, J. A., Calero, J. M., Barrón, V., Torrent, J., Del Campillo, M. C., Gallardo, A., & Villar, R. (2014). Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177: 16-25. doi: 10.1002/jpln.201200652
- Anicua-Sánchez, R., Gutiérrez-Castorena, M. C., Sánchez-García, P., Ortiz-Solorio, C., Volke-Halle, V. H., Rubiños-Panta, E. (2009). Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlite y zeolite. *Agricultura Técnica en México*, 35 (2): 147-156. doi: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=60812688002>
- Araméndiz-Tatis, H., Cardona-Ayala, C., & Correa-Álvarez, E. (2013). Efecto de diferentes sustratos en la calidad de plántulas de berenjena (*Solanum melongena* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(1): 55-61.
- Bento, L. R., Castro, A. J. R., Moreira, A. B., Ferreira, O. P., Bisinoti, M. C., & Melo, C. A. (2019). Release of nutrients and organic carbon in different soil types from hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinasse. *Geoderma*, 334: 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.034>

- Bethancourt, G., James, A., Villarreal, J. E., & Marin-Calvo, N. (2019) Biomass carbonization -production and characterization of biochar from rice husk. 7th International Engineering, *Sciences and Technology Conference (IESTEC)*. doi: 10.1109/iestec46403.2019.00016
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81: 687-711. doi:10.2136/sssaj2017.01.0017
- Blok, C., van der Salm, C., Hofland-Zijlstra, J., Streminska, M., Eveleens, B., Regelink, I., Fryda, L., & Visser, R. (2017). Biochar for Horticultural Rooting Media Improvement: Evaluation of Biochar from Gasification and Slow Pyrolysis. *Agronomy* 7: 1-23. doi:10.3390/agronomy7010006
- Bracho, J., Pierre, F., & Quiroz, A. (2009). Caracterización de componentes de sustratos locales para la producción de plántulas de hortalizas en el estado de Lara, Venezuela. *Bioagro*, 21(2): 117-124.
- Cabrera, R. I. (1999). Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 5: 5-11.
- Calva, C., & Espinosa, J. (2017). Efecto de la aplicación de cuatro materiales de encalado en control de la acidez de un suelo de Loreto, Orellana. *Siembra*, 4: 110-120.
- Cho, M. S., Meng, L., Song Ji-Hye, Han, S. H., Bae, K., & Park, B. B. (2017) The effects of biochars on the growth of *Zelkova serrata* seedlings in a containerized seedling production system. *Forest Science and Technology*, 13(1): 25-30. doi:10.1080/21580103.2017.1287778
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2000). Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000. Estudios, muestreos y análisis. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. Tomo DLXV-12:6-74.
- Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Huang, X., Li, Z., Tan, X., Zeng, G. & Zhou, L. (2017). Potential benefits of biochar in agricultural soils: A review. *Pedosphere*, 27(4): 645-661.
- Escalante-Rebolledo, A., Pérez-López, G., Hidalgo-Moreno, C., López-Collado, J., Campos-Alves, J., Valtierra-Pacheco, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra*

Latinoamericana, 34: 367-382. Obtenido de:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57346617009>

- García, C. O., Alcántar, G. G., Cabrera, R. I., Gavi, R. F., & Volke, H. V. (2001). Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum allisii* cultivadas en maceta. *Terra Latinoamericana*, 19 (3): 249-258.
- Gayosso-Rodríguez, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M.A., & Garruña, R. (2018a). Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia*, 52(4): 639-652.
- Gayosso-Rodríguez, S., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M. A., & Garruña, R. (2018b). Caracterización físico-química de mezclas de residuos orgánicos utilizados como sustratos agrícolas. *Bioagro*, 30(3): 179-198. Obtenido de: <https://revistas.uclave.org/index.php/bioagro/article/view/2716/1698>
- Gayosso-Rodríguez, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M.A., & Garruña-Hernández, R. (2016). Sustratos para producción de flores. *Agrociencia*, 50(5): 617-631.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30246698007>
- Guo, Y., Niu, G., Starman, T., Volder, A., & Gu, M. (2018). Poinsettia growth and development response to container root substrate with biochar. *Horticulturae*, 4: 2-14. doi:10.3390/horticulturae4010001
- Gutiérrez-Castorena, M. C., Hernández-Escobar, J., Ortiz-Solorio, C. A., Anicua-Sánchez, R., & Hernández-Lara, M. E. (2011). Relación porosidad-retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(3): 183-196
- Herrera, E., Feijoo, C., Alfaro, R., Solís, J., Gómez, M, Keiski, R. & Cruz, G. (2018). Producción de biocarbón a partir de biomasa residual y su uso en la germinación y crecimiento en vivero de *Capparis scabrida* (sapote). *Scientia Agropecuaria*, 9(4): 569-577. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.13>
- Huang, L., & Gu, M. (2019). Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants-A review. *Horticulturae*, 5: 2-25. doi.10.3390/horticulturae50100147

- Iglesias-Abad, S., Alvarez-Vera, M., Vázquez, J., & Salas-Macías, C. (2020). Biochar de biomasa residual de eucalipto (*Eucalytus globulus*) mediante dos métodos de pirólisis. *Manglar*, 17(2): 105-111. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2020.016>
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. 1990. Containers and Growing Media, Vol. 2. The Container Tree Nursery Manual. Agric. Handbook 674. USDA Forest Service. Washington, DC. USA. 88 p.
- Mathias-Schlegel, M., Ibrahim, B., Kipping-Rössel, D., Ortiz-Laurel, H., & Frías, J. (2018). Generación de biocarbón a partir del material sólido en la hidrólisis aeróbico-microbiológica. *Agroproductividad*, 11: 27-33. <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i11.1279>
- Medina, O. L. E., & Medina, O. I. N. (2017). Prototipo autotérmico móvil para la producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoamericana*, 36: 121-129. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>
- Morales-Maldonado, E. R., & Casanova-Lugo, F. (2015). Mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos, tamaño de partícula y proporción. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2): 365-372. doi: 10.15517/am.v26i2.19331
- Pérez-Salas, R. A., Tapia-Fernández, A. C., Soto, G., & Benjamín, T. (2013). Efecto del bio-carbón sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* y el desarrollo de plantas de banano (*Musa AAA*). *Revista Electrónica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica (INTERSEDES)*, 14(27): 66-100.
- Pire, R., & Pereira, A. (2003). Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado de Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro*, 15(1): 55-64. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85715107>
- Pratiwi, E. P. A., Hillary, A. K., Fukuda, T., & Shinogi, Y. (2016). The effects of rice husk char on ammonium, nitrate and phosphate retention and leaching in loamy soil. *Geoderma*, 277:61-68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.006>
- Rodríguez, A., Lemos, D., Trujillo, Y. T., Amaya, J. G. & Ramos, L. D. (2019). Effectiveness of biochar obtained from corncob for immobilization of lead in contaminated soil. *Journal of Health & Pollution*, 9(23): 1-10.

- Sánchez-Pilcorema, S., Condoy-Gorotiza, A., Sisalima-Morales, P., Barrezueta-Unda, S., & Jaramillo-Aguilar, E. (2020). Uso de biocarbones en medios de cultivo para el crecimiento de *Trichoderma spp.* In vitro. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(2): 66-72.
- Sánchez-Reinoso, A. D., Ávila-Pedraza, E. A., & Restrepo-Díaz, H. (2020). Use of biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*, 25 (2): 327-338. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n2.79466>
- SAS Institute. (2004). SAS/STAT users guide version 9.1. New York, USA: SAS Institute.
- Singh, A., Singh, A. P., & Purakayastha, T. J. (2019). Characterization of biochar and their influence on microbial activities and potassium availability in an acid soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65: 1302-1315. doi:10.1080/03650340.2018.1563291
- Velázquez-Maldonado, J., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alejo-Santiago, G., Valdez-Aguilar, L. A., Alia-Tejacal, I., ... & Guillén-Sánchez, D. (2019). Concentración nutrimental de biocarbón de cascarilla de arroz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42: 129-136. Obtenido de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018773802019000200129&lng=es&tlng=es
- Wacal, C., Ogata, N., Basalirwa, D., Handa, T., Sasagawa, D., Acidri, R., ... & Nishihara, E. (2019). Growth, seed yield, mineral nutrients and soil properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) as influenced by biochar addition on upland field converted from paddy. *Agronomy*, 9, 55. doi:10.3390/agronomy9020055
- Webber, C., Jr, P., Spaunhorst, D, Lima, I, & Petrie, E. (2018). Sugarcane biochar as an amendment for greenhouse growing media for the production of cucurbit seedlings. *Journal of Agricultural Science*, 10. doi:10.5539/jas.v10n2p104
- Webber, C., Jr, P., Spaunhorst, D, & Petrie, E. (2017). Impact of sugarcane bagasse ash as an amendment on the physical properties, nutrient content and seedling growth of a certified organic greenhouse growing media. *Journal of Agricultural Science*, 9. doi:10.5539/jas.v9n7p1

- Zahid, Z., Iftikhar, S., Ahmad, K. S., & Gul, M. M. (2018). Low-cost and environmental-friendly Triticum aestivum derived biochar for improving plant growth and soil fertility. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(22), 2814-2827. doi: 10.1080/00103624.2018.1546869
- Zhang, X., Luo, Y., Müller, K., Chen, J., Lin, Q., Xu, J., ...& Wang, H. (2016). Research and application of biochar in china. *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barries*, Ed. Especial 63. doi:10.2136/sssaspecpub63.2014.0049

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES GENERALES

Los mayores rendimientos del biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica (34.9 - 37.8 %) se obtuvieron con la adición de ácido cítrico a 10 %, y ácido maleico al 5 y 10 % como catalizadores. En general, por la concentración nutrimental total y extraíble del biocarbón, su conductividad eléctrica (0.30 – 0.46 dS m⁻¹), así como su estructura con microesferas, el biocarbón de ápices de caña de azúcar podría servir como mejorador de suelos, especialmente en suelos alcalinos debido al pH ácido del biocarbón producido.

El biocarbón de cascarilla de arroz al 7 % mezclado con suelo incrementó un 87.01 % la biomasa fresca, 20.84 % la biomasa seca y 78.31 % el área foliar por lo que se puede utilizar como medio de crecimiento en plantas de lechuga orejona cv. Tinajero.

El biocarbón de ápices de caña de azúcar se puede aplicar hasta en 21 % en mezcla con suelo como medio de crecimiento en plantas, ya que esta dosis favoreció el mayor crecimiento de las plantas y además, se obtuvo un incremento de 163.92 % en la biomasa fresca de lechuga orejona.

El biocarbón de ápices de caña de azúcar al 7 % utilizado como medio de crecimiento mejoró el crecimiento de plantas de albahaca tailandesa, expresado en incremento de 45.1 % en el peso fresco, 35.2 % en el peso de biomasa seca y 54.47 % en el área foliar.

La adición de hasta 40 % de biocarbón de cascarilla de arroz al medio de crecimiento universal (turba) no altera las propiedades físicas (porosidad total, porosidad de aireación y porosidad de retención de humedad). El crecimiento de plántulas de pepino con mezcla de biocarbón al 20 % es similar en longitud de tallo, biomasa fresca, biomasa seca y área foliar con respecto a las plántulas cultivadas bajo 100 % de turba comercial; es decir, el biocarbón de cascarilla de arroz puede ser una alternativa para reemplazar, parcialmente, la turba comercial en la producción de plántulas de pepino.

APÉNDICE

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas volumen 12 número 4 16 de mayo - 29 de junio, 2021

Ensayo

Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas

Carlos Alberto Pérez-Cabrera¹

Porfirio Juárez-Lopez^{1§}

José Anzaldo-Hernández²

Irán Alía-Tejagal¹

Eduardo Salcedo-Pérez³

Rosendo Balois-Morales⁴

¹Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural-Facultad de Ciencias Agropecuarias-Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Avenida Universidad 1001. Cuernavaca, Morelos, México. CP. 62210.

²Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías-Universidad de Guadalajara. Blvd. Marcelino García Barragán 1421, Esquina Calzada Olímpica, Guadalajara, Jalisco, México. CP. 44430. ³Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias-Universidad de Guadalajara. Camino Ramón Padilla Sánchez núm. 2100, Nextipac, Zapopan, Jalisco, México. CP. 45200. ⁴Unidad de Tecnología de Alimentos-Secretaría de Investigación y Posgrado-Universidad Autónoma de Nayarit. Ciudad de la Cultura s/n, Tepic, Nayarit, México. CP. 63000.

§Autor para correspondencia: porfirio.juarez@uaem.mx.

Resumen

El biocarbón, llamado en inglés *biochar*, es un material poroso sólido rico en carbono que se obtiene por la conversión termoquímica de la biomasa y de materiales orgánicos de origen agrícola o forestal en un ambiente limitado o carente de oxígeno. En el presente artículo de revisión se plantearon dos objetivos: 1) proporcionar una reseña de las técnicas de producción de biocarbón; y 2) realizar una revisión sobre el efecto del biocarbón en el crecimiento y la productividad de cultivos. Se incluyen las investigaciones de biocarbón en la agricultura realizadas en México, costos de producción, así como las tendencias y perspectivas de investigación. La búsqueda de los artículos científicos del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas publicados en el periodo de enero de 2011 a diciembre de 2020 se realizó a través de las bases de datos Web of Science, Dialnet, Redalyc y Scielo. Esta revisión muestra que en los últimos 10 años existe un incremento de investigaciones en el uso de biocarbón en la agricultura, debido que la mayoría de las investigaciones han reportado efectos positivos en el crecimiento y rendimiento de los cultivos; asimismo, es necesario incrementar investigaciones de biocarbón elaborado con biomasa vegetal y materiales orgánicos de disponibilidad local. La mayoría de los estudios de biocarbón se han realizado en cereales y algunas hortalizas, por lo que es necesario realizar investigaciones del efecto del biocarbón en plantas ornamentales, así como en hierbas aromáticas y en plantas medicinales.

Palabras clave: biochar, carbonización hidrotérmica, mejorador de suelos, pirólisis, rendimiento de cultivos.

Recibido: enero de 2021

Aceptado: marzo de 2021

Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos

Chemical characterization of biochar from sugarcane tips produced by hydrothermal carbonization and addition of organic catalysts

Carlos Alberto Pérez-Cabrera¹, Porfirio Juárez-López^{1,2}, José Anzaldo-Hernández²,
Irán Alía-Tejaca¹, Eduardo Salcedo-Pérez³, Dagoberto Guillén-Sánchez¹,
Rosendo Balois-Morales⁴, Víctor López-Martínez¹ y Rogelio Castro-Brindis⁵

¹ Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Avenida Universidad 1001, 62210 Cuernavaca, Morelos, México.

² Autor para correspondencia (porfirio.juarez@uaem.mx)

³ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, Olímpica, 44430 Guadalajara, Jalisco, México.

⁴ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Ramón Padilla Sánchez 2100, Nextipuc, 45200 Zapopan, Jalisco, México.

⁵ Universidad Autónoma de Nayarit, Secretaría de Investigación y Posgrado, Unidad de Tecnología de Alimentos, Ciudad de la Cultura Amado Nervo, Boulevard Tepic-Xalisco s/n, 63155 Tepic, Nayarit, México.

⁶ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitoecología, Carretera México-Tezcoco km 38.5, Chapingo, 56230 Texcoco, Estado de México, México.

RESUMEN

El biocarbón es un material rico en carbono, obtenido por conversión termoquímica elaborado de materiales orgánicos en un ambiente limitado de oxígeno, que puede usarse como mejorador de suelos. El objetivo de la investigación fue evaluar el rendimiento de biocarbón convertido, la concentración nutrimental y la estructura del biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos. El diseño experimental fue completamente al azar con seis repeticiones. Los tratamientos fueron tres catalizadores: ácido cítrico, maleico y propiónico en concentraciones al 5 y 10% cada uno, los cuales se adicionaron en la elaboración del biocarbón; el testigo fue biocarbón sin adición de catalizador, para un total de siete tratamientos. Se determinó el rendimiento de conversión de biomasa a biocarbón, la concentración nutrimental total de N, P, Ca, Mg y el elemento Na; también se determinó la concentración extraíble de los mismos nutrimentos con excepción del Na, así como el pH y la conductividad eléctrica y la estructura del

biocarbón. Los mayores rendimientos del biocarbón elaborado con ápices de caña de azúcar mediante carbonización hidrotérmica fueron de 37.8% con la adición de ácido cítrico a 10% como catalizador, así como 34.9 y 36.1% con la adición de ácido maleico a 5 y 10%, respectivamente. En general, por la concentración nutrimental total y extraíble del biocarbón, su conductividad eléctrica (0.30-0.46 dS m⁻¹), así como su estructura con microesferas, el biocarbón de ápices de caña de azúcar podría servir como mejorador de suelos, especialmente en suelos alcalinos debido al pH ácido del biocarbón producido.

Palabras clave: carbonización hidrotérmica, catalizadores orgánicos, concentración nutrimental, mejorador de suelos, *Saccharum officinarum*.

SUMMARY

Biochar is a carbon-rich material obtained by thermochemical conversion produced from organic materials in an oxygen-limited environment, which can be used as a soil enhancer. The objective of the research

Cita recomendada:

Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alía-Tejaca, I., Salcedo-Pérez, E., Guillén-Sánchez, D., Balois-Morales, R., López-Martínez, V. y Castro-Brindis, R. (2021). Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-11. e936. <https://doi.org/10.28940/terra.v39n0.936>

Recibido: 21 de febrero de 2021. Aceptado: 12 de abril de 2021.
Artículo. Volumen 39, mayo de 2021.

Rice husk biochar as a substrate for growth of cucumber seedlings

Biocarbón de cascarilla de arroz como sustrato en el crecimiento de plántulas de pepino

Carlos Alberto Pérez-Cabrera¹; Porfirio Juárez-López^{1*};
José Anzaldo-Hernández²; Irán Alía-Tejacal¹; Salomé Gayosso-Rodríguez³;
Eduardo Salcedo-Pérez⁴; Dagoberto Guillén-Sánchez¹;
Rosendo Balois-Morales⁵; Lourdes G. Cabrera-Chavarría⁶

¹Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad, núm. 1001, Cuernavaca, Morelos, C. P. 62210, MÉXICO. ²Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Blvd. Marcelino García Barragán, núm. 1421, Esquina Calzada Olímpica, Guadalajara, Jalisco, C. P. 44430, MÉXICO. ³Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Teapa km 25, Villahermosa, Tabasco, C. P. 86298, MÉXICO. ⁴Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Ramón Padilla Sánchez, núm. 2100, Nextipac, Zapopan, Jalisco, C. P. 45200, MÉXICO. ⁵Universidad Autónoma de Nayarit. Ciudad de la Cultura Amado Nervo, Blvd. TepicXalisco s/n, Tepic, Nayarit, C. P. 63000, MÉXICO. ⁶Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Tonalá. Av. Nuevo Periférico, núm. 555, Ejido San José Tateposco, Tonalá, Jalisco, C. P. 48525, MÉXICO.

*Corresponding author: porfirio.juarez@uam.mx, porfiriojlopez@yahoo.com, tel. 777 10334 26.

Abstract

Biochar is a carbon-rich material derived from plant residues and obtained by thermochemical techniques in an oxygen-limited environment or in the absence of it. The aim was to evaluate the physical properties of mixtures of rice husk biochar as a substrate component and their effect on the growth of cucumber seedlings. The treatments were: rice husk biochar (BC) and commercial peat moss (T; Sunshine mix 3), as well as mixtures of both in different proportions (20:80, 40:60, 60:40 and 80:20 %, respectively). For physical characterization, particle size, bulk density, total porosity, aeration porosity and water-holding porosity were evaluated. Additionally, nutrient concentration was determined. To evaluate the effect of biochar on cucumber seedling growth, stem length, fresh weight of aerial and root biomass, leaf area, dry weight of aerial and root biomass, and relative chlorophyll content (SPAD readings) were considered. It was found that the addition of up to 40 % BC to the universal growth medium (peat moss) does not alter the physical properties of total porosity, aeration porosity, and water-holding porosity; furthermore, the growth of cucumber seedlings in a 20 % BC mixture is similar in stem length, fresh biomass, dry biomass and leaf area to seedlings grown with 100 % peat moss.

Keywords:

Cucumis sativus, hydrothermal carbonization, growing media, physical and chemical properties, soilless culture.

Resumen

El biocarbón es un material rico en carbono derivado de residuos vegetales y que se obtiene mediante técnicas termoquímicas en un ambiente limitado de oxígeno o en ausencia de éste. El objetivo fue evaluar las propiedades físicas de mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz como componente de sustrato y su efecto en el crecimiento de plántulas de pepino. Los tratamientos fueron: biocarbón de cascarilla de arroz (BC) y turba comercial (T; Sunshine mix 3), así como mezclas de ambos en diferentes proporciones (20:80, 40:60, 60:40 y 80:20 %, respectivamente). Para la caracterización física, se evaluó la granulometría, la densidad aparente, la porosidad total, la porosidad de aireación y la porosidad de humedad. Adicionalmente, se determinó la concentración nutricional. Para evaluar el efecto del biocarbón en el crecimiento de plántulas de pepino se consideró la longitud de tallo, el peso fresco de biomasa aérea y de raíz, el área foliar, el peso seco de biomasa aérea y de raíz, y el contenido relativo de clorofila (lecturas SPAD). Se encontró que la adición de hasta 40 % de BC al medio de crecimiento universal (turba) no altera las propiedades físicas de porosidad total, porosidad de aireación y porosidad de retención de humedad; además, el crecimiento de plántulas de pepino en mezcla de BC al 20 % es similar en longitud de tallo, biomasa fresca, biomasa seca y área foliar a las plántulas cultivadas con 100 % de turba.

Palabras clave: *Cucumis sativus*, carbonización hidrotérmica, medios de crecimiento, propiedades físicas y químicas, cultivo sin suelo.

Please cite this article as follows (APA 6): Pérez-Cabrera, C. A. Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alía-Tejacal, I., Gayosso-Rodríguez, S., Salcedo-Pérez, E., Guillén-Sánchez, D., Balois-Morales, R., & Cabrera-Chavarría, L. G. (2021). Rice husk biochar as a substrate for growth of cucumber seedlings. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(3), 171-183. doi: 10.5154/rchsh.2021.01.002

Received: January 10, 2021 / Accepted: March 27, 2021



Revista Chapingo
Serie Horticultura

<https://revistas.chapingo.mx/horticultura/>