

# Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera

## Influence of biochar applied to soil on yield and quality attributes of fodder oats

Ernesto Concilco Alberto<sup>1</sup>, Alejandro Moreno Reséndez<sup>2\*</sup>, Mario García Carrillo<sup>2\*</sup>, Héctor M. Quiroga Garza<sup>3</sup> y Oscar Ángel García<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante del Programa de Posgrado; <sup>2</sup> Posgrado en Ciencias en Producción Agropecuaria, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez km 1.5 y Carretera a Santa Fe S/N. 27059 Torreón, Coahuila, México.

<sup>3</sup> Autor responsable (alejamosa@yahoo.com.mx y alejamosa@hotmail.com)

<sup>3</sup> INIFAP, Campo Experimental La Laguna, CIRNOC. Carretera Torreón-Matamoros km 17.5. 27440 Matamoros, Coahuila, México.

\* Integrante del Cuerpo Académico Sistemas Sustentables para la Producción Agropecuaria UAAAN-CA-14.

### RESUMEN

El suelo es un recurso imprescindible para la producción agrícola y, por lo tanto, requiere de condiciones adecuadas para favorecer una nutrición adecuada de los cultivos y generar mayores rendimientos. El biocarbón (BC) ha sido propuesto ampliamente para mejorar la calidad del suelo y la productividad de los cultivos. El objetivo del estudio fue evaluar los efectos del biocarbón sobre el rendimiento y calidad de la avena forrajera, en el periodo otoño-invierno 2016-2017. Un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones fue usado, el cual incluía tres tratamientos y un testigo: T0 = testigo absoluto; T1 = [fertilización convencional: (120-60-00 kg ha<sup>-1</sup>)]; T2 = (2.25 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarbón + fertilización convencional); T3 = (4 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarbón + fertilización convencional). El experimento se condujo en campo abierto con una densidad de siembra de 120 kg ha<sup>-1</sup>. Las variables evaluadas fueron: altura de planta (AP), materia verde (MV), materia seca (MS); fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA), proteína cruda (PC), nutrientes digestibles totales (NDT), digestibilidad de la materia seca (DMS). Los datos registrados se sometieron a análisis de varianza y las medias se compararon con la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ). Diferencias estadísticas significativas ( $\leq 0.05$ ) se observaron para AP y MV, donde T2 registró el mayor valor de 33 y 102%, respectivamente, frente al control. Se concluye que la aplicación de biocarbón

influye positivamente sobre atributos de rendimiento de avena forrajera. Sin embargo, se deben realizar estudios más detallados, considerando condiciones distintas al presente estudio.

**Palabras clave:** altura de planta, enmienda edáfica, producción de biomasa, retención de nutrimentos.

### SUMMARY

Soil is an essential resource for agricultural production. It requires appropriate conditions to promote good crop nutrition and to generate higher yields. Biochar (BC) has been widely proposed to improve soil quality and crop productivity. The aim of this study was to evaluate the effects of biochar on yield and quality of fodder oats, in the period from autumn-winter 2016-2017. A randomized block design with four replications was used. Three treatments and one control were employed: T0 = control; T1 = conventional fertilization (120-60-00 kg ha<sup>-1</sup>); T2 = 2.25 Mg ha<sup>-1</sup> of biochar + conventional fertilization; T3 = 4 Mg ha<sup>-1</sup> of biochar + conventional fertilization. The experiment was conducted under field conditions using a sowing density of 120 kg ha<sup>-1</sup>. The evaluated variables were plant height (PH), green matter (GM), dry matter (DM); neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), crude protein (CP), total digestive nutrients (TDN) and dry matter digestibility (DMD). The recorded data were subjected to analysis of variance

#### Cita recomendada:

Concilco A., E., A. Moreno Reséndez, M. García Carrillo, H. M. Quiroga Garza y O. A. García. 2018. Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera. Terra Latinoamericana 36: 221-228.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.375>

Recibido: diciembre de 2017. Aceptado: mayo de 2018.

Publicado en Terra Latinoamericana 36: 221-228.

and the means were compared with the Tukey test ( $P < 0.05$ ). Significant statistical differences ( $\leq 0.05$ ) were observed for PH and GM, for which T2 had 33 and 102% higher values, respectively, compared with the control. It is concluded that the application of biochar has a positive influence on yield attributes of forage oats. However, more detailed studies should be carried out, considering conditions other than those of the present study.

**Index words:** *biomass production, edaphic amendment, nutrient retention, plant height.*

## INTRODUCCIÓN

El sector agrícola juega un papel importante en la satisfacción de la demanda de alimentos para la población humana, así como para la producción de los alimentos destinados a la explotación pecuaria, donde el suelo es un recurso imprescindible (Hungria *et al.*, 2016). Sin embargo, actualmente los suelos presentan problemas de degradación que afectan su productividad y, por lo tanto, disminuyen la productividad de los cultivos (Trupiano *et al.*, 2017).

Algunas prácticas pueden mejorar la productividad agrícola; por ejemplo, la incorporación de materiales orgánicos al suelo (Murphy, 2015; Putwattana *et al.*, 2015; Woldetsadik *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2017). La aplicación de biocarbón (BC) ha sido propuesta como una opción de gran interés debido a sus beneficios en el suelo y cultivos (Dai *et al.*, 2016; Plaza *et al.*, 2016; Trupiano *et al.*, 2017).

El BC es el subproducto sólido del proceso de pirólisis (Jung *et al.*, 2016), un proceso de conversión termoquímica de la biomasa (Bruun *et al.*, 2017), el cual, se lleva a cabo en condiciones limitadas o en ausencia de oxígeno (Ahmed *et al.*, 2016). La temperatura para elaborar BC puede variar de 300 a 1000 °C (Li *et al.*, 2016; Tripathi *et al.*, 2016). La materia prima para elaborar BC se basa en la utilización de residuos orgánicos, por lo que puede ser muy diversa y asequible (Wu *et al.*, 2017).

El BC es un material rico en carbono (Purakayastha *et al.*, 2016; Nguyen *et al.*, 2017) y, resistente a la descomposición (Liao *et al.*, 2016). Cuando el BC ha sido incorporado al suelo puede mejorar su calidad (Ajayi *et al.*, 2016; Ye *et al.*, 2016; Biederman *et al.*, 2017), puesto que ha influido positivamente sobre sus propiedades físicas, químicas y bióticas (Mukherjee

y Lal, 2014; Coumaravel *et al.*, 2015; Subedi *et al.*, 2016; Mia *et al.*, 2017), mejorando los contenidos de materia orgánica, aireación, textura (Ajayi *et al.*, 2016), retención de humedad, y disponibilidad de elementos químicos nutritivos para las plantas (Aker *et al.*, 2013; Kanthle *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2016; Biederman *et al.*, 2017; Esfadbod *et al.*, 2017). El BC ha llegado a actuar como inmovilizador de oligoelementos contaminantes (Jones *et al.*, 2016) y también ha mejorado aspectos relacionados con la actividad enzimática (Wang *et al.*, 2015). Por otro lado, el BC ha influido positivamente sobre las poblaciones y la actividad de los microorganismos benéficos para las especies vegetales (Akhtar *et al.*, 2015; Liao *et al.*, 2016; Tripti *et al.*, 2017). Por consiguiente, impactos positivos sobre la germinación (Clay *et al.*, 2016), crecimiento y desarrollo de los cultivos (Pérez-Salas *et al.*, 2013; Fawad *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017a), y producción de biomasa pueden ser generados (Lou *et al.*, 2016). Esto podría traducirse en mejores rendimientos de los cultivos (Mackie *et al.*, 2015; Dai *et al.*, 2016; Plaza *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2016b; Mia *et al.*, 2017; Trupiano *et al.*, 2017). Además, cabe mencionar que el origen de la materia prima del BC coadyuva en la mitigación de efectos adversos sobre el ambiente (Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016). Sin embargo, los efectos del BC sobre la calidad de los cultivos no han sido muy estudiados (Petruccielli *et al.*, 2015).

El uso del BC ha ido en aumento en diversas partes del mundo (Ajayi *et al.*, 2016); sin embargo, más estudios sobre sus efectos son necesarios (Hammer *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Ajayi *et al.*, 2016; Aller, 2016; Prapagdee y Tawinteung, 2017; Seehausen *et al.*, 2017), puesto que sus propiedades no serán siempre las mismas, debido a que dependerán de las características de la materia prima y las condiciones de la pirólisis (Clay *et al.*, 2016; Laghari *et al.*, 2016; Tripathi *et al.*, 2016). Asimismo, los efectos del BC sobre los cultivos estarán influenciados por las cantidades aplicadas, el tipo de suelo y la especie vegetal cultivada (Cely *et al.*, 2015); de tal forma que, así como pueden encontrarse efectos benéficos, también podrían encontrarse efectos nulos o desfavorables (Mackie *et al.*, 2015; Escalante-Rebolledo *et al.*, 2016; Plaza *et al.*, 2016; Smebye *et al.*, 2016; Trupiano *et al.*, 2017). En atención a los elementos descritos, el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de BC al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad nutricional de la avena forrajera (*Avena sativa* L.).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna (UAAAN-UL), Torreón, Coahuila, localizado entre los 25° 33' N, y 103° 22' O, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2016-2017. El clima de la región, según la clasificación de Köppen modificada por García (1981), se caracteriza por una altitud promedio de 1100 m, clima seco-desértico, con promedios anuales de temperatura, evaporación y precipitación de 21 °C, 2000 y 258 mm, respectivamente.

Un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones fue usado; los tratamientos evaluados fueron: T0 (control absoluto); T1 [fertilización convencional: N-P-K (120-60-00 kg ha<sup>-1</sup>)]; T2 (fertilización convencional + 2.25 Mg ha<sup>-1</sup> de BC), y T3 (fertilización convencional + 4 Mg ha<sup>-1</sup> de BC). El BC utilizado fue comercial, elaborado con biomasa de bambú (*Bambusa vulgaris* Schard. Ex J. C. Wendl., y *Bambusa oldhammi* Munro), en pirolisis de 650 °C, durante 4.5 horas. El área total de la parcela experimental fue de 160 m<sup>2</sup>, dividida en 16 unidades experimentales de 10 m<sup>2</sup> (2 × 5 m). Las características químicas del suelo y del BC utilizados se presentan en el Cuadro 1.

El BC fue aplicado e incorporado según el procedimiento empleado por Zhang *et al.* (2016a). La siembra de avena, variedad Cuauhtémoc, se llevó a cabo, el 2 de noviembre de 2016, al voleo; la densidad de siembra fue de 120 kg ha<sup>-1</sup> (Flores-Félix *et al.*, 2014). Posteriormente, la fertilización se realizó de forma manual. Durante el ciclo del cultivo se aplicaron cinco riegos por gravedad con láminas aproximadas de entre 80-100 mm, con intervalos promedio de 24 días; el primer riego se realizó el 5 de noviembre 2016 y el último fue el 8 de febrero de 2017. Para la prevención de ataque de la plaga pulgón, una dosis proporcional a 500 mL ha<sup>-1</sup> de Dimetoato se aplicó a los 35 días después de la siembra (Cuéllar *et al.*, 2015).

### Variables

Las variables evaluadas fueron: altura de planta (AP) y materia verde (MV) determinadas a los 100 y 110 días después de la siembra, respectivamente, mediante el procedimiento utilizado por Trujano *et al.* (2008). Además, la materia seca (MS) se determinó por el método utilizado por Reyes *et al.* (2010).

Las muestras de forraje seco se molieron y tamizaron en un molino Thomas Wiley Mini-Mill (Modelo: S55PZE-7831, Thomas Scientific®); después, dichas muestras se almacenaron en frascos de vidrio. Los atributos de calidad del forraje registrados fueron: proteína cruda (PC) determinada con micro-Kjeldahl (AOAC, 1990); fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN) fueron determinadas con el método descrito por Van Soest *et al.* (1991). Los nutrientes digestibles totales (NDT) (Alves *et al.*, 2011) y el porcentaje de digestibilidad de la materia seca (DMS) (Moore y Undersander, 2002) fueron determinados por medio de las siguientes ecuaciones:  $NDT = 102.56 - (FDA \times 1.140)$ ;  $DMS = 88.9 - 0.779 \times FDA$ .

Los datos obtenidos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) utilizando el Paquete de Diseños Experimentales V. 2.4 de Olivares-Sáenz (1993). Cuando se determinaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre tratamientos, las comparaciones de medias fueron realizadas con la prueba de Tukey.

**Cuadro 1. Variables físico-químicas del suelo con profundidad de 30 cm y del biocarbón elaborado con biomasa de bambú (*Bambusa vulgaris* Schard. Ex J. C. Wendl. y *Bambusa oldhammi* Munro) utilizados en el estudio.**

Variable	Suelo	Biocarbón
pH	8.27	8.85
Materia orgánica (MO) (%)	2.41	0.25
Conductividad eléctrica (CE) (mScm <sup>-1</sup> )	1.8	2.55
Calcio (Ca) (mg kg <sup>-1</sup> )	234	194
Magnesio (Mg) (mg kg <sup>-1</sup> )	8.4	12.5
Sodio (Na) (mg kg <sup>-1</sup> )	127	302
Nitratos de nitrógeno (N-NO <sub>3</sub> ) (mg kg <sup>-1</sup> )	9.4	27
Fósforo disponible (P) (mg kg <sup>-1</sup> )	21.6	38.8
Potasio (K) (mg kg <sup>-1</sup> )	201	332
Fierro (Fe) (mg kg <sup>-1</sup> )	1.85	3.55
Cobre (Cu) (mg kg <sup>-1</sup> )	0.42	0.86
Zinc (Zn) (mg kg <sup>-1</sup> )	0.55	1.25
Manganeso (Mn) (mg kg <sup>-1</sup> )	2.75	4.02
RAS (%)	2.22	5.66
PSI (%)	1.97	6.62

RAS = relación de absorción de sodio; PSI = por ciento de sodio intercambiable.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ) entre tratamientos fueron apreciadas al considerar la variable AP. Al tratamiento T2 se asoció 33% más de AP que la correspondiente a las plantas del T0. La AP asociada a T2 fue numéricamente mayor que las atribuidas al resto de los tratamientos, pero las diferencias fueron no significativas (Cuadro 2). El comportamiento registrado de la AP de avena coincide con los resultados reportados por Pérez-Salas *et al.* (2013) quienes al aplicar 20 Mg ha<sup>-1</sup> de BC, activado y sin activar, al suelo cultivado con plantas de banano variedad Gros Michel Musa (AAA), concluyeron que el aumento de la altura de las plantas se debió a la aplicación del producto mencionado. Aunque las especies vegetales son diferentes y los suelos son de regiones también diferentes, la dosis aplicada en el experimento del caso presente fue al menos cinco veces menor a la dosis de 20 Mg ha<sup>-1</sup> y favoreció la altura de las plantas de avena.

Liu *et al.* (2017b) reportaron resultados similares con respecto a la variable AP en el cultivo de trigo. Ellos evaluaron dosis de 48 Mg ha<sup>-1</sup> de BC elaborado con paja de maíz; el valor mayor que reportaron fue de 86 cm cuando aplicaron BC, representando 5% más AP que la relacionada al control, por lo que señalaron que, al incorporar BC al suelo, la porosidad mejoró al reducirse la densidad aparente, además de que el potasio aplicado se mantuvo disponible en mayor cantidad. Por ello, podría sugerirse que la mayor altura registrada, en el presente estudio, pudo deberse a tal efecto, puesto

**Cuadro 2. Atributos evaluados relativos al rendimiento de avena forrajera, en respuesta a la aplicación de biocarbón de bambú (*Bambusa vulgaris* Schard. Ex J. C. Wendl. y *Bambusa oldhammi* Munro).**

Tratamiento	Altura de planta	Materia verde	Materia seca
	cm	Mg ha <sup>-1</sup>	%
T0	89.5 b	31.50 c	26.0 a
T1	108.6 a	44.25 bc	26.4 a
T2	119.94 a	63.85 a	29.0 a
T3	119.1 a	56.90 ab	26.7 a

T0 = testigo absoluto; T1 = fertilización convencional; T2 = 2.25 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarbón + fertilización convencional; T3 = 4 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarbón + fertilización convencional. Letras distintas en la misma columna indican diferencia significativa, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).

que se realizó la aplicación de potasio junto con el BC. Asimismo, Fawad *et al.* (2017) registraron hasta 33% mayor AP cuando aplicaron BC en relación al control; ellos concluyeron que el BC disminuye la pérdida de los fertilizantes aplicados, debido a su capacidad de adsorción. En este mismo sentido Ahmad *et al.* (2011) y Torres-Moya *et al.* (2016) mencionan que con la adición de fertilizantes se mejora el desarrollo del cultivo de avena. Tal práctica pudo favorecer la influencia positiva del BC sobre la AP en el presente estudio.

Con la variable MV se apreciaron diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ). El valor mayor se asocia al T2, representando 102% más producción que la del T0, T1 y T3 tuvieron diferencias numéricas de 44 y 12% menos MV, respectivamente, que T2 (Cuadro 2). La tendencia fue similar en el estudio de Zhang *et al.* (2016a) quienes obtuvieron mayor MV en el cultivo de maíz cuando aplicaron 20 Mg ha<sup>-1</sup> de BC, ya que ellos registraron un 12.9% más de producción en relación al control; por sus resultados, ellos sugirieron que el BC mejoró la disponibilidad de los elementos nutritivos en el suelo aportados por los fertilizantes. Pese a la diferencia de tipos de cultivos, suelos y dosis de BC, el BC ha influido sobre la producción de MV y como es el caso del presente experimento, aunque la dosis utilizada de BC es menor, la diferencia fue significativa.

Trupiano *et al.* (2017) también encontraron mayor producción de MV al aplicar BC en el cultivo de lechuga en macetas. Estos autores reportaron que la actividad de las enzimas relacionadas con los ciclos del nitrógeno, fósforo y carbono resultaron mejoradas con la aplicación de este material; esa práctica favoreció la disponibilidad de estos elementos para las plantas y mantuvo disponible más humedad en el suelo. También Torres-Moya *et al.* (2016) mencionaron que la aplicación de fertilizante nitrogenado mejora la MV del cultivo de avena; por lo tanto, el BC pudo haber mejorado la disponibilidad de nitrógeno en el presente estudio.

La materia seca es uno de los indicadores de importancia de la calidad de un forraje, ya que influye sobre la digestibilidad y consumo de los rumiantes (Salas-Pérez *et al.*, 2010). Para la variable de MS no se obtuvo diferencia estadística significativa con el uso de BC; sin embargo, el valor mayor se obtuvo con T2, en el cual, se utilizó BC. La MS por efecto de T2 fue mayor 11, 8 y 8.6% a T0, T1 y T3, respectivamente (Cuadro 2). Albuquerque *et al.* (2013) observaron

la misma tendencia cuando aplicaron BC más una dosis de fertilizante sintético en el cultivo de trigo, ya que no encontraron diferencia estadísticamente significativa para esta variable. Por otro lado, aunque no evaluaron el impacto del uso de BC pero usaron biosólidos y fertilización sintética Flores-Félix *et al.* (2014), tampoco encontraron diferencia significativa para MS en avena.

Para las variables evaluadas sobre la calidad nutricional del forraje, no se asociaron diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ; Cuadro 3). No se tienen registros acerca de la influencia del BC sobre PC en avena. No obstante, el valor mayor de PC fue 11% por efecto de T3. Por otro lado, Espitia *et al.* (2012) encontraron un valor promedio de 10.8% al considerar varias etapas fenológicas y sugieren que este factor tiene gran influencia sobre los contenidos de PC, puesto que conforme la edad de la planta es mayor, los contenidos de PC disminuyen. Así mismo, Ramírez *et al.* (2015) mencionan que, de forma general, el nivel crítico de PC en el cultivo de avena para un buen funcionamiento del rumen de los animales consumidores es de 7%. El nivel óptimo de PC, según Trujano *et al.* (2008), es de 9.1%. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio con la aplicación de BC, son mayores que el nivel óptimo señalado, lo que indica que es benéfico para los animales.

Una concentración grande de fibra tiene una correlación negativa con la proporción de almidón, y consecuentemente, una disminución del contenido energético de la avena (NRC, 2000). En este estudio no existió diferencia estadísticamente significativa para los contenidos de fibras al aplicar diferentes niveles de BC; es nula la información referente a la influencia del BC sobre esta variable en el cultivo de avena, cabe

mencionar que se ha observado la misma tendencia con otros tratamientos, como en el estudio de Trujano *et al.* (2008), quienes obtuvieron diferencias no significativas cuando aplicaron diferentes cantidades de estiércol y vermicompost.

Para las variables NDT y DMS no se apreciaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos con la aplicación de BC (Cuadro 3). El valor máximo para NDT fue de 13% y para DMS de 42.6%. No existen reportes sobre los efectos del BC sobre dichas variables en avena forrajera. Sánchez-Gutiérrez *et al.* (2014) mencionan que la etapa fisiológica al momento de la cosecha puede influir sobre NDT, ellos reportaron valores de hasta 56% cuando cosecharon avena de la variedad Karma en la etapa lechoso-masoso. Por lo tanto, podría deducirse que esos factores influyeron sobre los contenidos de NDT obtenidos en este estudio, los cuales, fueron más bajos, aunque aceptables para los animales. Del mismo modo para DMS ellos reportaron un valor mayor (61.7%) en comparación de los obtenidos en este estudio. Según Barnes (1990) además de la etapa fisiológica, también la variedad utilizada puede ser un factor que determina los contenidos de DMS.

### CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en las condiciones inherentes al presente estudio, la aplicación de biocarbón (BC) al suelo cultivado con avena forrajera podría ser una alternativa para mejorar el rendimiento de dicho cultivo. El BC influyó benéficamente sobre altura de plantas y producción de biomasa de avena. Sin embargo, la aplicación de BC al suelo no mejoró la calidad nutricional del forraje de avena con respecto

**Cuadro 3. Valores medios y significancia estadística de los parámetros analizados relativo a la calidad de la materia seca de avena forrajera, en respuesta a los diferentes tratamientos aplicados.**

Variable	PC	FDA	FDN	NDT	DMS
	----- % -----				
T0	8.68 a	58.0 a	75 a	21.3 a	43.7 a
T1	10.36 a	60.7 a	75 a	17.6 a	41.6 a
T2	10.83 a	63.8 a	73 a	13.2 a	39.2 a
T3	11a	59.4 a	67 a	19.4 a	42.6 a

T0 = testigo absoluto; T1 = fertilización convencional; T2 = 2.25 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarbón + fertilización convencional; T3 = 4 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarbón + fertilización convencional. PC = proteína cruda; FDA = fibra detergente ácido; FDN = fibra detergente neutro; NDT = nutrientes digestibles totales; DMS = digestibilidad de la materia seca. Promedios con la misma letra en las columnas indican igualdad estadística, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ).

al tratamiento control. Es recomendable continuar con más estudios sobre los efectos del BC, a mediano y largo plazos, en diferentes cantidades de aplicación al suelo considerando como respuesta las propiedades del suelo y, atributos de las plantas de otras especies cultivadas.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante la realización de estudios de maestría. A los Dres. Juan Diego García Paredes y Juan Manuel Guillén Muñoz por las sugerencias para mejorar el documento.

## LITERATURA CITADA

- Ahmad, A. H., A. Wahid, F. Khalid, N. Fiaz, and M. S. I. Zamir. 2011. Impact of organic and inorganic sources of nitrogen and phosphorus fertilizers on growth, yield and quality of forage oat (*Avena sativa* L.). *Cercetari Agronom. Moldova* 44: 39-49. doi: 10.2478/v10298-012-0040-7.
- Ahmed, M. B., J. L. Zhou, H. H. Ngo, and W. Guo. 2016. Insight into biochar properties and its cost analysis. *Biom. Bioener.* 84: 76-86. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.002.
- Ajayi, A. E., D. Holthausen, and R. Horn. 2016. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. *Soil Tillage Res.* 155: 166-175. doi:10.1016/j.still.2015.08.007.
- Aker, C., G. Soto, A. Imbach, X. Castillo y F. Garro. 2013. Efecto de la aplicación de biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos en la retención de humedad y otras características de suelo en el rendimiento de maíz (*Zea mays*), en tres texturas de suelo en León, Nicaragua. Artículo generado de la Tesis de grado de Magister Scientiae en Agricultura Ecológica. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Akhtar, S. S., M. N. Andersen, M. Naveed, Z. A. Zahir, and F. Liu. 2015. Interactive effect of biochar and plant growth-promoting bacterial endophytes on ameliorating salinity stress in maize. *Funct. Plant Biol.* 42: 770-781. doi: 10.1071/fp15054.
- Alburquerque, J. A., P. Salazar, V. Barrón, J. Torrent, M. C. del Campillo, A. Gallardo, and R. Villar. 2013. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agron. Sust. Dev.* 33: 475-484. doi: 10.1007/s13593-012-0128-3.
- Alves, A. R., P. M. G. Beelen, D. M. A. Nunes, S. G. Neto y R. N. Beelen. 2011. Consumo e digestibilidade do feno de sabiá por caprinos e ovinos suplementados com polietilenoglicol. *Rev. Caatinga* 24: 152-157.
- Aller, M. F. 2016. Biochar properties: Transport, fate, and impact. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.* 46: 1183-1296. doi: 10.1080/10643389.2016.1212368.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemist). 1990. *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemist. Arlington, VA, USA. ISBN: 0-935584-42-0.
- Barnes, R. F. 1990. Biotechnology in tall fescue improvement. pp. 1-12. *In*: M. J. Kasperbauer (ed.). *Importance and problems of tall fescue*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Biederman, L. A., J. Phelps, B. J. Ross, M. Polzin, and W. S. Harpole. 2017. Biochar and manure alter few aspects of prairie development: A field test. *Agric. Ecosyst. Environ.* 236: 78-87. doi:10.1016/j.agee.2016.11.016.
- Bruun, S., S. L. Harmer, G. Bekiaris, W. Christel, L. Zuin, Y. Hu, L. S. Jensen, and E. Lombi. 2017. The effect of different pyrolysis temperatures on the speciation and availability in soil of P in biochar produced from the solid fraction of manure. *Chemosphere* 169: 377-386. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.11.058.
- Cely, P., G. Gascó, J. Paz-Ferreiro, and A. Méndez. 2015. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 111: 173-182. doi: 10.1016/j.jaap.2014.11.014.
- Clay, S. A., K. K. Krack, S. A. Bruggeman, S. Papiernik, and T. E. Schumacher. 2016. Maize, switchgrass, and ponderosa pine biochar added to soil increased herbicide sorption and decreased herbicide efficacy. *J. Environ. Sci. Health B* 51: 497-507. doi: 10.1080/03601234.2016.1170540.
- Coumaravel, K., R. Santhi, and S. Maragatham. 2015. Effect of biochar on yield and nutrient uptake by hybrid maize and on soil fertility. *Indian J. Agric. Res.* 49: 185-188. doi:10.5958/0976-058x.2015.00028.1.
- Cuéllar V., E. J., P. Hernández Rojas y C. Ríos Quiroz. 2015. Paquete tecnológico de avena forrajera. pp. 33-35. *In*: Ó. Pimentel A. y S. Delgadillo A. (coord.). *Agenda Técnica Agrícola de Coahuila*. SAGARPA. México, D. F. ISBN: 978-607-7668-16-9.
- Dai, Z., X. Zhang, N. Muhammad, J. Wu, P. C. Brookes, and J. Xu. 2016. Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review. *Sci. Total Environ.* 581-582: 601-611. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.169.
- Escalante-Rebolledo, A., G. Pérez-González, C. Hidalgo-Moreno, J. López-Collado, J. Campo-Alves, E. Valtierra-Pacheco y J. D. Etchevers-Barra. 2016. Biocarbón (biochar) 1- naturaleza, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.
- Esfadbod, M., I. R. Phillips, B. Miller, M. Rezaei R., Z. M. Lan, P. Srivastava, B. Singh, and C. R. Chen. 2017. Aged acidic biochar increases nitrogen retention and decreases ammonia volatilization in alkaline bauxite residue sand. *Ecol. Engin.* 98: 157-165. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.10.077.
- Espitia R., E., H. E. Villaseñor M., R. Tovar G., M. de la O y A. Limón O. 2012. Momento óptimo de corte para rendimiento y calidad de variedades de avena forrajera. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3: 771-783.
- Fawad H., S. A., M. Aown, L. Ali, Z. Aslam, M. Khalid, and M. Naveed. 2017. Application of *Dalbergia sissoo* biochar enhanced wheat growth, yield and nutrient recovery under reduced fertilizer doses in calcareous soil. *Pak. J. Agri. Sci.* 54: 1107-1115. doi: 10.21162/PAKJAS/17.5102.
- Flores-Félix, E., H. Moreno-Casillas, U. Figueroa-Viramontes y M. D. C. Potisek-Talavera. 2014. Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (*Avena sativa* L.) con aplicación de biosólidos. *Terra Latinoamericana* 32: 99-106.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía UNAM. México, D. F.

- Hammer, E. C., M. Forstreuter, M. C. Rillig, and J. Kohler. 2015. Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress. *Appl. Soil Ecol.* 96: 114-121. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.07.014.
- Hungria, M., M. A. Nogueira, and R. S. Araujo. 2016. Inoculation of *Brachiaria* spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: An environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 221: 125-131. doi:10.1016/j.agee.2016.01.024.
- Jones, S., R. P. Bardos, P. S. Kidd, M. Mench, F. de Leij, T. Hutchings, A. Cundy, C. Joyce, G. Soja, W. Friesl-Hanl, R. Herzig, and P. Menger. 2016. Biochar and compost amendments enhance copper immobilisation and support plant growth in contaminated soils. *J. Environ. Manage.* 171: 101-112. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.024.
- Jung, K. W., K. Kim, T. U. Jeong, and K. H. Ahn. 2016. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and phosphate adsorption capability of biochar derived from waste-marine macroalgae (*Undaria pinnatifida* roots). *Bioresour. Technol.* 200: 1024-1028. doi: 10.1016/j.biortech.2015.10.016.
- Kanthle, A. K., N. K. Lenka, S. Lenka, and K. Tedia. 2016. Biochar impact on nitrate leaching as influenced by native soil organic carbon in an Inceptisol of central India. *Soil Tillage Res.* 157: 65-72. doi: 10.1016/j.still.2015.11.009.
- Kim, H. S., K. R. Kim, J. E. Yang, Y. S. Ok, G. Owens, T. Nehls, G. Wessolek, and K. H. Kim. 2016. Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response. *Chemosphere* 142: 153-159. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.06.041.
- Laghari, M., Z. Hu, M. S. Mirjat, B. Xiao, A. A. Tagar, and M. Hu. 2016. Fast pyrolysis biochar from sawdust improves the quality of desert soils and enhances plant growth. *J. Sci. Food Agric.* 96: 199-206. doi: 10.1002/jsfa.7082.
- Li, J., J. Dai, G. Liu, H. Zhang, Z. Gao, J. Fu, Y. He, and Y. Huang. 2016. Biochar from microwave pyrolysis of biomass: A review. *Biomass Bioener.* 94: 228-244. doi: 10.1016/j.biombioe.2016.09.010.
- Liao, N., Q. Li, W. Zhang, G. Zhou, L. Ma, W. Min, J. Ye, and Z. Hou. 2016. Effects of biochar on soil microbial community composition and activity in drip-irrigated desert soil. *Eur. J. Soil Biol.* 72: 27-34. doi: 10.1016/j.ejsobi.2015.12.008.
- Liu, L., Y. Wang, X. Yan, J. Li, N. Jiao, and S. Hu. 2017a. Biochar amendments increase the yield advantage of legume-based intercropping systems over monoculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* 237: 16-23. doi: 10.1016/j.agee.2016.12.026.
- Liu, Q., B. Liu, Y. Zhang, Z. Lin, T. Zhu, R. Sun, X. Wang, J. Ma, Q. Bei, G. Liu, X. Lin, and Z. Xie. 2017b. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N<sub>2</sub>O emissions? *Soil Biol. Biochem.* 104: 8-17. doi: 10.1016/j.soilbio.2016.10.006.
- Lou, Y., S. D. Joseph, L. Li, E. R. Graber, X. Liu, and G. Pan. 2016. Water extract from straw biochar used for plant growth promotion an initial test. *BioResources* 11: 249-266. doi: 10.15376/biores.11.1.249-266.
- Mackie, K. A., S. Marhan, F. Ditterich, H. P. Schmidt, and E. Kandeler. 2015. The effects of biochar and compost amendments on copper immobilization and soil microorganisms in a temperate vineyard. *Agric. Ecosyst. Environ.* 201: 58-69. doi: 10.1016/j.agee.2014.12.001.
- Mia, S., B. Singh, and F. A. Dijkstra. 2017. Aged biochar affects gross nitrogen mineralization and recovery: A <sup>15</sup>N study in two contrasting soils. *GCB Bioenergy* 9: 1196-1206. doi: 10.1111/gcbb.12430.
- Moore, J. E. and D. J. Undersander. 2002. Relative forage quality: An alternative to relative feed value and quality index. pp. 16-32. *In: Proc. of the 13th Annu. Florida Ruminant Nutrition Symposium.* University of Florida. Gainesville, FL, USA.
- Mukherjee, A. and R. Lal. 2014. The biochar dilemma. *Soil Res.* 52: 217-230. doi: org/10.1071/SR13359.
- Murphy, B. W. 2015. Impact of soil organic matter on soil properties -a review with emphasis on Australian soils. *Soil Res.* 53: 605-635. doi: 10.1071/sr14246.
- Nguyen, T. T. N., C. Y. Xu, I. Tahmasbian, R. Che, Z. Xu, X. Zhou, H. M. Wallace, and S. H. Bai. 2017. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma* 288: 79-96. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.11.004.
- NRC (National Research Council). 2000. Nutrient requirements of beef cattle. Seventh revised edition: Update 2000. The National Academy Press. Washington, DC, USA. doi: 10.17226/9791.
- Olivares-Sáenz, E. 1993. Paquete de diseños experimentales versión 2.4. Facultad de Agronomía UANL. Marín, NL, México.
- Pérez Salas, R. A., 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* 14: 66-100.
- Petrucelli, R., A. Bonetti, M. L. Traversi, C. Faraloni, M. Valagussa, and A. Pozzi. 2015. Influence of biochar application on nutritional quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Crop Pasture Sci.* 66: 747-755. doi: 10.1071/cp14247.
- Plaza, C., B. Giannetta, J. M. Fernández, E. G. López-de-Sá, A. Polo, G. Gascó, A. Méndez, and C. Zaccone. 2016. Response of different soil organic matter pools to biochar and organic fertilizers. *Agric. Ecosyst. Environ.* 225: 150-159. doi: 10.1016/j.agee.2016.04.014.
- Prapagdee, S. and N. Tawinteung. 2017. Effects of biochar on enhanced nutrient use efficiency of green bean, *Vigna radiata* L. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 24: 9460-9467. doi: 10.1007/s11356-017-8633-1.
- Purakayastha, T. J., K. C. Das, J. Gaskin, K. Harris, J. L. Smith, and S. Kumari. 2016. Effect of pyrolysis temperatures on stability and priming effects of C3 and C4 biochars applied to two different soils. *Soil Tillage Res.* 155: 107-115. doi: 10.1016/j.still.2015.07.011.
- Putwattana, N., M. Kruatrachue, A. Kumsopa, and P. Pokethititook. 2015. Evaluation of organic and inorganic amendments on maize growth and uptake of cd and zn from contaminated paddy soils. *Int. J. Phytoremed.* 17: 165-174. doi: 10.1080/15226514.2013.876962.
- Ramírez, S., D. Domínguez, J. J. Salmerón, G. Villalobos y J. A. Ortega. 2015. Contreo en surco y etapa de madurez sobre la producción y calidad del forraje de variedades de avena. *Arch. Zootec.* 64: 237-244.
- Reyes, G. A., J. J. Espinoza, G. G. García E., F. Pastor, R. Faz C. y M. Fortis H. 2010. Evaluación de variedades de avena forrajera bajo condiciones de humedad residual en la Comarca Lagunera. *Agrofaz* 10: 129-136.

- Salas-Pérez, L., P. Preciado-Rangel, J. R. Esparza-Rivera, V. D. P. Álvarez-Reyna, A. Palomo-Gil, N. Rodríguez-Dimas y C. Márquez-Hernández. 2010. Rendimiento y calidad de forraje hidropónico producido bajo fertilización orgánica. *Terra Latinoamericana* 28: 355-360.
- Sánchez-Gutiérrez, R. A., H. Gutiérrez-Bañuelos, A. Serna-Pérez, R. Gutiérrez-Luna y A. Espinosa-Canales. 2014. Producción y calidad de forraje de variedades de avena en condiciones de temporal en Zacatecas, México. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 5: 131-142.
- Seehausen, M. L., N. Gale, S. Dranga, V. Hudson, N. Liu, J. Michener, E. Thurston, C. Williams, S. M. Smith, and S. C. Thomas. 2017. Is there a positive synergistic effect of biochar and compost soil amendments on plant growth and physiological performance? *Agronomy* 7: 1-15. doi:10.3390/agronomy7010013
- Smebye, A., V. Alling, R. D. Vogt, T. C. Gadmar, J. Mulder, G. Cornelissen, and S. E. Hale. 2016. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition. *Chemosphere* 142: 100-105. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.04.087.
- Subedi, R., N. Taupe, I. Ikoyi, C. Bertora, L. Zavattaro, A. Schmalenberger, J. J. Leahy, and C. Grignani. 2016. Chemically and biologically-mediated fertilizing value of manure-derived biochar. *Sci. Total Environ.* 550: 924-933. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.160.
- Torres-Moya, E., D. Ariza-Suárez, C. D. Baena-Aristizabal, S. Cortés-Gómez, L. Becerra-Mutis y C. Riaño-Hernández. 2016. Efecto de la fertilización en el crecimiento y desarrollo del cultivo de la avena (*Avena sativa*). *Pastos Forrajes* 39: 102-110.
- Tripathi, M., J. N. Sahu, and P. Ganesan. 2016. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renew. Sust. Ener. Rev.* 55: 467-481. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.122.
- Tripti, A. Kumar, Z. Usmani, V. Kumar, and Anshumali. 2017. Biochar and flyash inoculated with plant growth promoting rhizobacteria act as potential biofertilizer for luxuriant growth and yield of tomato plant. *J. Environ. Manage.* 190: 20-27. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.060.
- Trujano, S. L. D., A. González P., J. Jaimes J., J. A. Cueto W. y J. R. Hernández S. 2008. Evaluación de fertilizantes sobre la avena forrajera. *Rev. Chapingo Serie Zonas Aridas* 7: 73-82.
- Trupiano, D., C. Coccozza, S. Baronti, C. Amendola, F. P. Vaccari, G. Lustrato, S. Di Lonardo, F. Fantasma, R. Tognetti, and G. S. Scippa. 2017. The effects of biochar and its combination with compost on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and soil microbial activity and abundance. *Int. J. Agron.* 2017: 1-12. doi:10.1155/2017/3158207.
- Van Soest, P. J., J. B. Robertson, and B. A. Lewis. 1991. Symposium: Carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. *J. Dairy Sci* 74: 3583-3597.
- Wang, X., D. Song, G. Liang, Q. Zhang, C. Ai, and W. Zhou. 2015. Maize biochar addition rate influences soil enzyme activity and microbial community composition in a fluvo-aquic soil. *Appl. Soil Ecol.* 96: 265-272. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.08.018.
- Woldetsadik, D., P. Drechsel, B. Keraita, B. Marschner, F. Itanna, and H. Gebrekidan. 2016. Effects of biochar and alkaline amendments on cadmium immobilization, selected nutrient and cadmium concentrations of lettuce (*Lactuca sativa*) in two contrasting soils. *SpringerPlus* 5: 397. doi: 10.1186/s40064-016-2019-6.
- Wu, S., H. He, X. Inthapanya, C. Yang, L. Lu, G. Zeng, and Z. Han. 2017. Role of biochar on composting of organic wastes and remediation of contaminated soils-a review. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 24: 16560-16577. doi: 10.1007/s11356-017-9168-1.
- Xie, W., L. Wu, Y. Zhang, T. Wu, X. Li, and Z. Ouyang. 2017. Effects of straw application on coastal saline topsoil salinity and wheat yield trend. *Soil Tillage Res.* 169: 1-6. doi: 10.1016/j.still.2017.01.007.
- Ye, M., M. Sun, Y. Feng, J. Wan, S. Xie, D. Tian, Y. Zhao, J. Wu, F. Hu, H. Li and X. Jiang. 2016. Effect of biochar amendment on the control of soil sulfonamides, antibiotic-resistant bacteria, and gene enrichment in lettuce tissues. *J. Hazard. Mater.* 309: 219-227. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.074.
- Zhang, D., G. Pan, G. Wu, G. W. Kibue, L. Li, X. Zhang, J. Zheng, J. Zheng, K. Cheng, S. Joseph, and X. Liu. 2016a. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. *Chemosphere* 142: 106-113. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.04.088.
- Zhang, J., G. Chen, H. Sun, S. Zhou, and G. Zou. 2016b. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost. *Bioresour. Technol.* 200: 876-883. doi: 10.1016/j.biortech.2015.11.016.