

Charcoal as improvement of an Acrisol cultivated with sugarcane (*Saccharum* spp.)

Carbón vegetal como mejorador de un Acrisol cultivado con caña de azúcar (*Saccharum* spp.)

Hernández-Hernández, Maribel¹; Palma-López, David J.¹; Salgado-García, Sergio¹; Palma-Cancino, David J.^{2*}; Rincón-Ramírez, Joaquín A.¹; Hidalgo-Moreno, Claudia I.³; Cuanalo-de la Cerda, Heriberto^{4†}

¹Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Cárdenas, Tabasco, México. C. P. 86500. ²Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara. Puerto Vallarta, Jalisco, México. C. P. 48220.

³Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.

⁴Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, Mérida, Yucatán, México. C. P. 97205.

*Autor para correspondencia: plusdpc@gmail.com

ABSTRACT

Objective: To analyze the effect of the addition of charcoal residues on physical and chemical properties of an Acrisol cultivated with sugarcane (*Saccharum* spp.) in the savannah of Huimanguillo, Tabasco, Mexico.

Design/methodology/approach: Unmarketable waste charcoal were used, from the company "El Cocoite", from Villahermosa, Tabasco, Mexico. An incubation with charcoal mixed with 300 g of soil was performed for different treatments: 0, 1.2g, 1.8g, 2.4g, 3.0g, 3.6 g, 4.2 g and 4.8 g. Two samples were made at 45 and 90 days, in each sample the soil moisture (SM), bulk density (Bd), pH (H₂O), organic carbon (OC), C/N, cation exchange capacity was measured (CEC), exchangeables bases, and exchangeable acidity were evaluating.

Results: The soil was improved in physical properties: by increasing soil moisture and keeping an appropriate Bd. The chemical properties such as CO, pH, CIC, Ca²⁺, Mg²⁺ Na⁺ and K⁺, were improved, and the exchangeable acidity reduced.

Limitations/study implications: Low crop yield in Acrisols used for sugarcane cultivation, limit the sustainability of this high economic impact agricultural activity in the Southeast of Mexico.

Findings/conclusions: This would help improve the availability of plant nutrients in the Ferric Acrisol cultivated with sugarcane.

Keywords: Charcoal residue, coal, biochar, Acrisol, soil degradation.

RESUMEN

Objetivo: Analizar el efecto de la adición de residuos de carbón vegetal sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo Acrisol cultivado con caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en la sabana de Huimanguillo, Tabasco, México.

Diseño/metodología/aproximación: Se utilizaron residuos de carbón vegetal no comercializable, proveniente de la empresa "El Cocoite", de Villahermosa, Tabasco, México. Para ello se realizó una incubación con los tratamientos: 0, 1.2 g, 1.8 g, 2.4 g, 3.0g, 3.6 g, 4.2 g y 4.8 g, de carbón mezclado con 300 g de suelo. Se realizaron dos muestreos, a los 45 y 90 días, en cada muestreo se midió la humedad aprovechable (Ha), densidad aparente (Da), pH (H₂O), carbono orgánico (CO), C/N, capacidad intercambió catiónico (CIC), bases intercambiables y acidez intercambiable.

Resultados: Se mejoraron las propiedades físicas del suelo, aumentando la Ha y conservando una Da apropiada. Las propiedades químicas del suelo como CO, pH, CIC, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺ mejoraron y se redujo la acidez intercambiable.

Limitaciones/implicaciones del estudio: Los bajos rendimientos en los Acrisoles utilizados para el cultivo de caña de azúcar, suponen una dificultad para la sustentabilidad de esta actividad agrícola de alta importancia económica en el Sureste de México.

Hallazgos/conclusiones: Esto ayudaría a mejorar la disponibilidad de nutrientes a la planta en el Acrisol férrico cultivado con caña de azúcar.

Palabras claves: Residuo de carbón vegetal, carbón, biochar, Acrisol, degradación de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectó una muestra de suelo de la capa arable, 0 a 20 cm de profundidad, en el área de cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) de la sabana de Huimanguillo, Tabasco, México (17° 54' 11" N y 93° 35' 03" O), en la Ranchería "La Esperanza". El suelo es un Acrisol Férrico con textura franco arcillo arenoso (Palma-López *et al.*, 2017).

El residuo de carbón vegetal o biochar utilizado en el experimento proviene de la empresa "El Coccoite". Para el experimento en incubación el suelo se secó al aire y se tamizó por una malla de 2 mm. Posteriormente se pesaron muestras equivalentes de 300 g de suelo seco, a los que se les añadieron las diferentes dosis de residuo de carbón. Las dosis de carbón fueron las siguientes: testigo (sin carbón), 1.20 g, 1.8 g, 2.4 g, 3.0 g, 3.6 g, 4.2 g y 4.8 g estos corresponden a 0 t ha⁻¹, 10 t ha⁻¹, 15 t ha⁻¹, 20 t ha⁻¹, 25 t ha⁻¹, 30 t ha⁻¹, 35 t ha⁻¹ y 40 t ha⁻¹ respectivamente. Se mezclaron para homogenizar cada lote.

Las mezclas se depositaron en vasos de plástico de diferentes colores, con cinco repeticiones. Los niveles de humedad se adecuaron con la adición de agua destilada y se cubrió con papel para film para evitar cualquier contaminación. Las muestras se incubaron en un anaquel metálico cubierto con un plástico negro para evitar al máximo posible la entrada de luz. Se mantuvo a temperatura ambiente un promedio de 25 °C a 30 °C, y la humedad al 80% de la capacidad de campo. Para asegurar el contenido de humedad del suelo, los botes se pesaron diariamente reponiendo el agua perdida y para mantener el contenido de humedad original, los periodos de incubación fueron de 45 y 90 días.

INTRODUCCION

En la sabana de Huimanguillo, Tabasco, México, hace varios años se establecieron plantaciones de caña de azúcar (*Saccharum spp.*), en suelos Acrisoles. A pesar de haber aplicado 2 t ha⁻¹ de cal agrícola, el cultivo presenta rendimientos bajos (<50 t ha⁻¹) (Salgado-García *et al.*, 2017). Estos suelos se caracterizan por ser muy intemperados, lixiviado y ácidos, son de colores oscuros sobre amarillentos a rojizos (Palma-Lopez *et al.*, 2017). Debido a ello hay necesidad de contar con información sobre el mejoramiento de la fertilidad de estos suelos cultivado con caña de azúcar, sobre todo con enmiendas orgánicas.

Una de estas enmiendas que no se han probado en la región es el uso de residuos de carbón vegetal o biochar, del cual se tienen estudios en el Amazonas en Brasil, donde se han detectado partículas similares al carbón en suelos con excelentes indicadores de fertilidad (Lehmann *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2008; Whitman *et al.*, 2011). En México el carbón vegetal es una de las fuentes de combustible fundamentales para el uso doméstico (Serrano-Medrano *et al.*, 2014). Este combustible se produce por carbonización de biomasa de diferentes especies maderables por medio de un proceso de pirólisis (Hamer *et al.*, 2004; Laird *et al.*, 2010).

En las carboneras del estado de Tabasco se manejan condiciones rústicas en la producción de carbón vegetal, lo que provoca que se tengan residuos de carbón vegetal de tamaño muy pequeño, que no son comercializables debido a la exigencia del mercado. Mucho de este residuo acaba contaminando el ambiente en las zonas rurales y urbanas. Al respecto, Glaser *et al.* (2002), menciona que estos residuos de carbón vegetal se pueden utilizar como enmiendas del suelo, por ello es necesario buscar alternativas para aprovechar este subproducto en los suelos degradados del estado de Tabasco.

Partiendo de lo anterior, en este trabajo se estudió, bajo condiciones controladas, el efecto de la adición de residuos de carbón vegetal sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo Acrisol Férrico, cultivado con caña de azúcar (*Saccharum spp.*).

Al término de cada período de incubación, las muestras se secaron al aire a la sombra, se molieron y tamizaron a través una malla de 2 mm, previendo de guardar algunos terrones sin moler para la determinación de la densidad aparente. A las muestras molidas y tamizadas se les determinó la Densidad aparente (Da), humedad aprovechable (Ha), pH, carbono orgánico (CO), relación C/N, capacidad de intercambio catiónico (CIC), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ intercambiable y acidez intercambiable. Todos los parámetros físicos y químicos se determinaron con las metodologías con base a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), en el Laboratorio de Suelos Planta y Agua (LASPA) del Colegio de Postgraduado Campus Tabasco.

Propiedades del residuo de carbón vegetal. Las metodologías utilizadas para los análisis de las propiedades del residuo de carbón, previo tamizaje a 2 mm, fueron: pH y conductividad eléctrica que se realizaron con una dilución carbón, agua 1:20 con un tiempo de agitación de 1.5 horas de acuerdo a Rajkovich *et al.* (2011). El fósforo extraíble se determinó con ácido cítrico al 2% por el procedimiento descrito por Wang *et al.* (2012). El carbono total fue determinado con un analizador automático TOC 5050 Shimadzu (Total Organic Carbon Analyzer). El nitrógeno total se determinó por el método Kjeldahl. La capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiable se determinaron por saturación de 1.0 g del carbón desplazando los cationes con acetato de amonio 1.0 N y en el lixiviado se cuantificaron las bases cambiables mediante espectrometría de absorción atómica (EAA) y flamometría, por el procedimiento descrito por Rajkovich *et al.* (2011). También se determinó la acidez intercambiable y la densidad aparente con base a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Diseño experimental. El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con cinco repeticiones y con arreglo factorial de los tratamientos, donde los factores fueron, las dosis de residuos de carbón con ocho niveles, y el tiempo de incubación con dos niveles (al 45 y a los 90 días). Los resultados se analizaron con el análisis del diseño factorial y la comparación de me-

dias de Tukey con 95% de significancia. Para el análisis se utilizó el paquete Statistical Analysis Software versión 9.4. (SAS Institute, Estados Unidos).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características químicas y físicas del residuo de carbón vegetal utilizado en este trabajo se pueden observar en el Cuadro 1.

El análisis de la varianza evidenció diferencias altamente significativas ($P \leq 0.001$), en el efecto de las dosis de la adición de residuos de carbón vegetal al suelo (tanto para el tiempo de incubación, así como a la interacción de estos factores. En la Figura 1 también se pueden apreciar los efectos inducidos por los factores dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación; las dosis aplicadas al suelo equivalentes a 25 t ha⁻¹, 30 t ha⁻¹, 35 t ha⁻¹, 40 t ha⁻¹, presentaron los mayores porcentajes de Ha. A su vez, la mayor retención de humedad del suelo se presentó a los 45 días de incubación, disminuyendo a los 90 días. Por lo tanto, se puede asegurar que al adicionar residuo de carbón vegetal se incrementa la cantidad de agua aprovechable disponible. De manera coincidente, en otros estudios también se ha demostrado que el adicionar biochar al suelo, incrementa la capacidad de campo y la capacidad de retención de agua disponible del suelo (Jones *et al.*, 2010; Laird *et al.*, 2010).

Efecto del residuo de carbón vegetal en la densidad aparente (Da) del suelo después de la incubación. Al analizar el efecto de la enmienda del residuo de carbón al suelo sobre la densidad aparente (Da) (Cuadro 2), se puede observar el efecto significativo mayor al final de la incubación con la dosis aplicada más alta (40 t ha⁻¹), conservando una Da apropiada (SEMARNAT, 2002). Contrario a lo que ocurre con el tiempo de incubación, el cual muestra un decremento de la Da con el tiempo (Figura 1), hasta niveles que indicarían alta porosidad, posiblemente explicando la reducción de la humedad aprovechable en el suelo. Acorde con Mukherjee *et al.* (2011), dicho comportamiento se puede deber al área de superficie del biochar que presenta en contacto al suelo, ya que dependiendo de la cantidad de área de

Cuadro 1. Características físicas y químicas del residuo de carbón vegetal.

Da g cm ⁻³	pH	CE dS m ⁻¹	Nt %	CO %	P mg kg ⁻¹	CIC	Ca	Mg	K	Na	Acidez
						cmol ₍₊₎ kg ⁻¹					
0.58	9.7	1.15	1.0	33.3	371	40.5	21.3	2.0	46.5	0.46	0.30

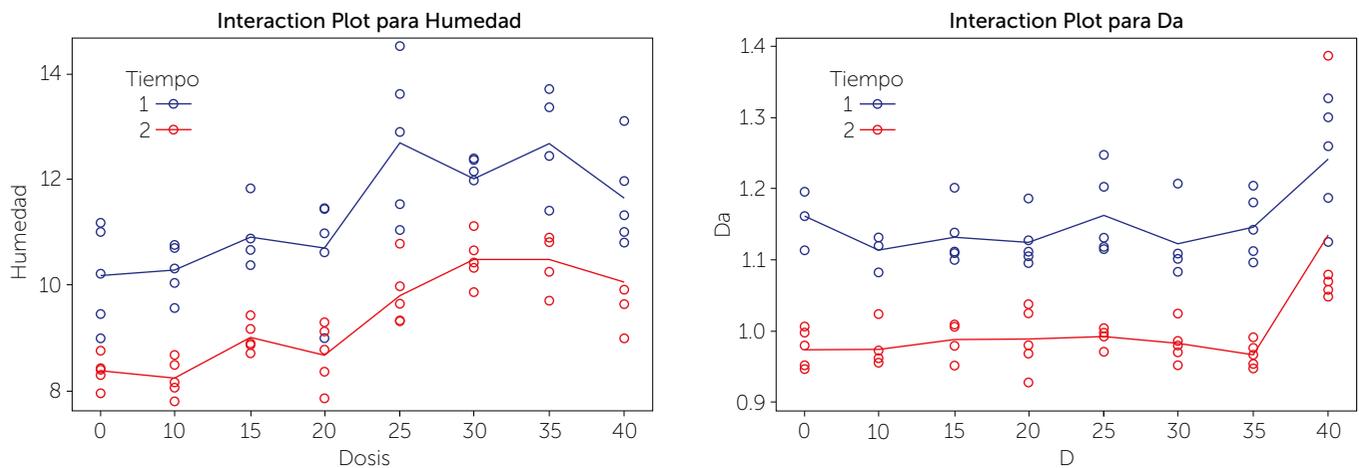


Figura 1. Efecto a la Humedad aprovechable (Ha) y densidad aparente (Da) del suelo en respuesta de la interacción de dosis de residuo de carbón enmendado al suelo y el tiempo de incubación. 0: Testigo, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 t dc 1 ha⁻¹. Tiempo 1=45 días de incubación y tiempo 2=90 días de incubación.

superficie se forman agregados, que contribuyen a una buena porosidad, agregación y aireación.

El residuo de carbón vegetal aumentó el carbono orgánico (CO) del suelo significativamente en la dosis más alta hasta 2.74 %, en comparación con el testigo que

presentó 2.37 % tomando en cuenta los 90 días de incubación (Cuadro 2). Resultados similares fueron observados por Laird *et al.* (2010), quienes reportaron que la adición de carbón vegetal al suelo, aumentó significativamente el contenido total de CO después de una incubación de 500 días. Para la relación

C/N del suelo, solo se tiene diferencias significativas en el tiempo de incubación dando como resultado un aumento de la relación C/N al final de la incubación (Cuadro 2). Dicho comportamiento puede deberse a su contenido tan elevado de carbono, y al entrar en contacto con el suelo, eleva la relación C/N,

Cuadro 2. Efecto de dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación en la densidad aparente (Da), carbono orgánico del suelo (CO), relación C/N del suelo y pH del suelo.

Incubación	Dosis de residuo de carbón vegetal t ha ⁻¹								Media tiempo
	T	10	15	20	25	30	35	40	
Da (g cm ⁻³)									
45 días	1.15ab	1.11bc	1.13ab	1.25ab	1.16ab	1.12ab	1.14ab	1.23a	115a
90 días	0.97d	0.97d	0.98d	0.98d	0.99cd	0.98d	0.96d	1.13ab	1.00b
\bar{X} dc	1.06 b	1.04 b	1.06 b	1.05b	1.07 b	1.05 b	1.05 b	1.18 a	
CO (%)									
45 días	2.34e	2.34e	2.34e	2.25e	2.25e	2.45bcde	2.44bcde	2.42cde	2.35b
90 días	2.39de	2.57bcde	2.59bcde	2.48bcde	2.75abcd	2.79ab	2.78abc	3.06a	2.68a
\bar{X} dc	2.37c	2.45bc	2.46bc	2.37c	2.50bc	2.62ab	2.61ab	2.74a	
C/N									
45 días	39.62a	38.59a	36.74a	37.24a	36.16a	39.33a	34.35a	32.4a	36.83b
90 días	36.6a	46.29a	43.11a	34.87a	39.93a	43.29a	42.53a	46.1a	41.59a
\bar{X} dc	38.11a	42.44a	39.92a	36.06a	38.05a	41.31a	38.44a	39.37a	
pH									
45 días	4.91g	5.11e	4.94g	5.17d	5.07ef	5.18cd	5.28a	5.21cd	5.11 b
90 días	5.07ef	5.26ab	5.06f	5.22bc	5.18cd	5.22bc	5.21cd	5.11e	5.16 a
\bar{X} dc.	4.99 e	5.19 b	5.00 e	5.19 b	5.12 d	5.20 b	5.24 a	5.16c	

Los valores de media con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey ≤ 0.05), \bar{X} dc=media dosis de carbón.

por sus estructuras aromáticas altamente condensadas y físicamente resistente a la degradación (Novak et al., 2010). Si se comparan los valores de la relación C/N con lo establecido por Salgado-García et al. (2013), se observa que estos son altos. Por lo que los tratamientos podrían considerarse como almacenes de carbono, pero con poca mineralización, lo cual afectaría la fertilidad del suelo (Deenik et al., 2010).

Efecto del residuo de carbón vegetal en el pH del suelo. El pH del suelo sin biochar se clasificó como fuertemente ácido (Cuadro 2). La adición de biochar solo produjo incrementos pequeños en el pH clasificándose como moderadamente ácido (Salgado-García et al., 2013). La prueba de Tukey muestra una tendencia de incremento conforme se aumenta las dosis de residuo de carbón vegetal, el pH mayor se encontró con la dosis de

35 t ha⁻¹. En cuanto al tiempo de incubación el comportamiento muestra un incremento significativo a los 90 días. Lo anterior puede deberse, a que el pH del residuo de carbón vegetal es alcalino (Cuadro 1). Los resultados también coinciden con lo encontrado por Fellet et al. (2011), al aplicar biochar en jales mineros encontraron que el pH del suelo se incrementó. Otra similitud se dio, al aplicar biochar al suelo y después de ser incubado durante 500 días, aumentó significativamente casi una unidad de pH (Lair et al., 2010).

Con respecto a la Capacidad Intercambio Catiónico (CIC) el efecto significativo mayor se observó al final de la incubación con la dosis aplicada de 40 t ha⁻¹, obteniendo un promedio de 11.43 cmol₍₊₎ kg⁻¹ (Cuadro 3). El efecto anterior coincide con lo encontrado por Cheng et al. (2008), que explican que dicho comportamiento

Cuadro 3. Efecto de dosis de residuo de carbón vegetal y tiempo de incubación en la capacidad intercambio catiónico (CIC) acidez intercambiable (AI) Bases intercambiables (Ca⁺² Mg⁺² K⁺ Na⁺).

Días de Incubación	Dosis de residuo de carbón vegetal t ha ⁻¹								Media tiempo
	T	10	15	20	25	30	35	40	
CIC (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)									
45 días	8.78	10.68abcd	10.08abcd	10.58abcd	11.38abc	12.07ab	12.27a	12.27a	11.0a
90 días	9.88bcd	9.68cd	9.88bcd	9.78cd	10.58abcd	10.38abcd	10.48abcd	10.58abcd	10.1b
\bar{X} dc	9.33c	10.18abc	9.98bc	10.18abc	10.98ab	11.23ab	11.38ab	11.43a	
AI (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)									
45 días	0.53a	0.41a	0.47a	0.37a	0.53a	0.26a	0.28a	0.24a	0.36b
90 días	0.53a	0.41a	0.53a	0.37a	0.39a	0.39a	0.36a	0.30a	0.41a
\bar{X} dc	0.53a	0.41a	0.50a	0.37a	0.37a	0.33a	0.32a	0.2a	
Ca ⁺² (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)									
45 días	3.31defg	4.06cde	4.27bcd	3.84cdef	4.53bc	5.21ab	4.94bc	6.18a	4.54 a
90 días	2.33g	2.71g	2.9fg	2.89fg	2.99efg	3.21defg	3.24defg	3.41defg	2.96 b
\bar{X} dosis carbón	2.82 d	3.38 cd	3.59bc	3.36 cd	3.76bc	4.21 ab	4.09 b	4.79 a	
K ⁺ (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)									
45 días	0.46abc	0.56ab	0.54ab	0.42bc	0.54ab	0.64a	0.60ab	0.65a	0.55a
90 días	0.33c	0.41bc	0.45abc	0.48abc	0.51abc	0.57ab	0.55ab	0.55ab	0.47b
\bar{X} dosis carbón	0.39c	0.48abc	0.49abc	0.45bc	0.53abc	0.61a	0.57ab	0.60a	
Mg ⁺² (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)									
45 días	0.93d	1.11bcd	1.10bcd	0.93d	1.18bcd	1.37abc	1.40ab	1.61a	1.20 a
90 días	0.88d	0.98d	1.01d	1.07cd	1.04d	1.16bcd	1.12bcd	1.06cd	1.04 b
\bar{X} dosis carbón	0.90d	1.04cd	1.06cd	1.00cd	1.11bc	1.27ab	1.26ab	1.30a	
Na ⁺ (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)									
45 días	0.18abcde	0.17abcde	0.19abc	0.20a	0.18abcd	0.20ab	0.19abc	0.22a	0.195a
90 días	0.066f	0.11dcef	0.11cdef	0.10ef	0.07f	0.1def	0.12bcdef	0.09f	0.100 b
\bar{X} dosis carbón	0.12 a	0.14a	0.15a	0.15 a	0.13 a	0.15 a	0.16 a	0.15a	

Los valores de media con letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey ≤ 0.05), \bar{X} dc=media dosis de carbón.

se debe a que el biochar presenta cargas superficiales y que, con la oxidación progresiva, la carga positiva disminuye y aumentan de carga negativa. A pesar de lo anterior los valores alcanzados de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) al aplicar residuo de carbón vegetal, representa una CIC baja (Salgado *et al.*, 2013).

En el Cuadro 3, se puede observar que las concentraciones de la acidez intercambiable disminuyen conforme se aumenta la dosis de residuo de carbón; en el caso del tiempo de incubación, este provocó un incremento significativo de la acidez intercambiable. Resultados similares obtuvieron Yuan y Xu (2011), quienes mencionan que el aluminio intercambiable y la acidez intercambiable disminuyeron al aplicar biochar al suelo, lo cual es atribuido al aumento de las bases intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico efectiva. Los mismos autores mencionan que las sustancias alcalinas del biochar son liberadas en el suelo y que neutralizan la acidez.

Efecto del residuo de carbón vegetal sobre las bases intercambiables del suelo. En el Cuadro 3, se puede observar que al adicionar residuo de carbón vegetal al suelo hay incremento de las bases intercambiables (Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^{+}), éstas aumentaron ligeramente conforme se fue aumentando las dosis, debido a que el residuo de carbón contiene suficientes bases intercambiable (Cuadro 1). El efecto anterior coincide con lo encontrado por otros autores (Steiner *et al.*, 2007; Yuan y Xu, 2011). De acuerdo con Glaser *et al.*, (2002), y Novak *et al.* (2010), la adición de biochar aumenta el estado de fertilidad de los suelos, debido a

que a la presencia de componentes inorgánicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} , que actúan como un agente de encalado.

Para el Na intercambiable (Cuadro 3), se observa diferencia significativa ($P \leq 0.05$) con el tiempo de incubación, reduciendo los contenidos de Na a los 90 días. Si se comparan los valores con lo mencionado por Salgado *et al.* (2013), es una concentración que no ocasiona problemas de salinidad.

CONCLUSIONES

Al aplicar residuos de carbón vegetal al suelo, se mejoraron las propiedades físicas y se aumentó la capacidad de retención de humedad, generando una densidad aparente apropiada para el suelo. En cuanto a las propiedades químicas, aumentó el CO, pH, capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+}), presentando disminución de acidez intercambiable. Esto último, ayudaría a mejorar la disponibilidad de nutrientes para la caña de azúcar cultivada en el suelo Acrisol Férrico.

LITERATURA CITADA

- Cheng, C.; Lehmann, J.; Thies, J.E.; & Burton, S.D. (2008). Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research* 11: 1–10.
- Deenik, J.L.; McClellan, T.; Goro, U., Jr., M.A.; & Campbell, S. (2010). Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations. *Soil Fertility & Plant Nutrition* 74: 1259–1270.
- Fellet, G.; Marchiol, L.; Delle-Vedove, G.; & Peressotti, A. (2011). Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation. *Chemosphere* 83: 1262–1267.
- Glaser, B.; Lehmann, J.; & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal. A review. *Biology & Fertility of Soils* 35: 219–230.
- Hamer, U.; Marschner, B.; Brodowski, S.; & Amelung, W. (2004). Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. *Organic Geochemistry* 35: 823–830.
- Jones, B.E.; Haynes, R.J.; & Phillips, I.R. (2010). Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties. *Journal of Environmental Management* 91: 2281–2288.
- Laird, D.A.; Fleming, P.; Davis, D.D.; Horton, R.; Wang, B.; & Karlen, D.L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158: 443–449.
- Lehmann, J.; Gaunt, J.; & Rondon, M. (2006). Biochar sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 403–427.
- Mukherjee, A.; Zimmerman, A.R.; & Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma* 163: 247–255.
- Novak, J.M.; Busscher, W.J.; Watts, D.W.; Laird, D.A.; Ahmedna, M.A.; & Niandou, M.A. (2010). Short-term CO_2 mineralization after additions of biochar and switchgrass to a typical Kandiudult. *Geoderma* 154: 281–288.
- Palma-López, D.J.; Jiménez-Ramírez, R.; Zavala-Cruz, J.; Bautista-Zúñiga, F.; Gavi, R.F.; y Palma-Cancino, D.Y. (2017). Actualización de la clasificación de suelos de Tabasco, México. *Agroproductividad* 10(12): 29–35.
- Rajkovich, S.; Enders, A.; Hanley, K.; Hyland, C.; Zimmerman, A.R.; & Lehmann, J. (2011). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils* 48: 271–287.
- Salgado-García, S.; Palma-Lopez, D.J.; Castellán-Estrada, M.; Lagunes-Espinosa, L.C.; y Ortiz-Laurel, H. (2013). Manual para muestreo de suelos, plantas y aguas, e interpretación de análisis para la producción sostenible de alimentos. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Cárdenas, Tabasco, México. 101 pp.

- Salgado-García, S.; Palma-López, D.J.; Zavala-Cruz, J.; Ortiz-García, C.F.; Lagunes-Espinoza, L.C.; Ortiz-Ceballos, A.I.; Córdova-Sánchez, S.; y Salgado-Velázquez, S. (2017). Los suelos ácidos de la sabana de Huimanguillo, Tabasco, México. *Agroproductividad* 10(12): 16–21.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México. México.
- Serrano-Medrano, M.; Arias-Chalico, T.; Ghilardi, A.; & Masera, O. (2014). Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development* 19: 39–46.
- Steiner, C.; Teixeira, W.G.; Lehmann, J.; Nehls, T.; Vasconcelos de Macêdo, J.L.; Blum, W.E.; & Zech, W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil* 291: 275–290.
- Yuan, J.-H.; & Xu, R.-K. (2011). The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management* 27: 110–115.
- Wang, T.; Camps-Arbestain, M.; Hedley, M.; & Bishop, P. (2012). Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant and Soil* 357: 173–187.
- Whitman, T.; Nicholson, C.F.; Torres, D.; & Lehmann, J. (2011). Climate change impact of biochar cook stoves in western Kenyan farm households: system dynamics model analysis. *Environmental Science and Technology* 45(8): 3687–3694.

