

Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz en Michoacán, México

Effect of the application of biochar in the corn yield in Michoacan, Mexico

Alfredo Mondragón-Sánchez¹ , Lenin Ejecatl Medina-Orozco^{1,†} ,
Alexander Sánchez-Duque¹  y Verónica Núñez-Oregel² 

¹ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Morelia. Departamento de Ciencias Agropecuarias. Carretera Morelia-Salamanca km 6.5. 58100 Morelia, Michoacán, México.

[†] Autor para correspondencia (leninmed@gmail.com)

² Universidad de la Ciénege del Estado de Michoacán de Ocampo. Av. Universidad Sur 3000, Lomas de Universidad. 59103 Sahuayo de Morelos, Michoacán, México.

RESUMEN

El biocarbón es el producto resultante de la transformación termoquímica de la biomasa vegetal por pirólisis. Sirve como enmienda en suelos y presenta beneficios en la producción agrícola. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del biocarbón en el rendimiento y la respuesta de variables agronómicas de un maíz comercial en Maravatío, Michoacán. El biocarbón se obtuvo de biomasa seca de olotes de maíz usando un reactor de pirólisis. Se aplicó en suelos arcillosos biocarbón finamente triturado a tasas de 1% (T1), 2% (T2) y un control 0% (T0). Las dosis fueron calculadas con base en el peso del suelo de la capa arable (10 cm). La dosis de fertilización fue $200_{\text{N}}-80_{\text{P}}-150_{\text{K}}-30_{\text{S}}$ para los tratamientos y el control. El diseño fue en bloques al azar con cuatro repeticiones de 9 m² cada una. La comparación de medias se realizó con la técnica de Tukey-Kramer. Los resultados indican un incremento en el rendimiento de 1.2 Mg ha⁻¹ (T1) y 1 Mg ha⁻¹ (T2), con respecto al control (T0). El peso de la mazorca, de grano por planta, olote y longitud de mazorca, presentaron la siguiente tendencia, T1 > T2 > T0. El diámetro de tallo y peso seco de la planta fue mayor en T1. La altura de la planta y diámetro de tallo fue mayor en T2. La profundidad de raíz no presentó diferencias significativas entre los tratamientos; sin embargo, la tendencia en el desarrollo lateral de raíces fue T2 > T1 > T0 que sugiere un efecto positivo para el desarrollo y exploración de la raíz que podría explicar

el incremento en el rendimiento. Se concluye que el biocarbón es una alternativa viable para aumentar la producción de maíz y favorece el desarrollo vegetativo de la planta en la región Oriente del estado de Michoacán.

Palabras clave: biomasa, enmiendas del suelo, Recsoil, secuestro de carbono, terra preta.

SUMMARY

Biochar is the product resulting from the thermochemical transformation of plant biomass by pyrolysis. It acts as soil enhancer and benefits agricultural production. The objective of the present study was to evaluate the effect of biochar on the corn yield and the response of agronomic variables of a commercial corn in Maravatio, Michoacan. The biochar was obtained from dry corncob biomass using a pyrolysis reactor. Finely crushed biochar was applied to clay soils at 1% (T1), 2% (T2) and control 0% (T0) rates. Doses were calculated based on topsoil (10 cm) weight. The fertilization dose was $200_{\text{N}}-80_{\text{P}}-150_{\text{K}}-30_{\text{S}}$ for the treatments and the control. The design was in randomized blocks with four repetitions of 9 m² each. The comparison of means was carried out with the Tukey-Kramer technique. The results indicate an increase in the yield of 1.2 Mg ha⁻¹ (T1) and 1 Mg ha⁻¹ (T2), compared to the control (T0). The weight of the ear, grain per plant, cob and ear length, showed the following trend: T1 > T2 > T0.

Cita recomendada:

Mondragón-Sánchez, A., Medina-Orozco, L. E., Sánchez-Duque, A. y Núñez-Oregel, V. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz en Michoacán, México. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-7. e896. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.896>

Recibido: 27 de noviembre de 2020. Aceptado: 05 de mayo de 2021.
Artículo. Volumen 39, junio de 2021.

The stem diameter and dry weight of the plant was greater in T1. Plant height and stem diameter were higher in T2. The root depth did not show significant differences between the treatments. However, the trend in lateral root development was $T2 > T1 > T0$, which suggests a positive effect for root development and exploration that could explain the increase in yield. It is concluded that biochar is a viable alternative to increase corn production and favors the vegetative development of the plant in the eastern region of the state of Michoacan.

Index words: *biomass, soil amendments, Recsoil, carbon sequestration, terra preta.*

INTRODUCCIÓN

El biocarbón es el resultado de la combustión de biomasa a altas temperaturas (300-700 °C) en condiciones privativas de oxígeno, proceso conocido como pirólisis y se refiere al carbón negro producido intencionalmente para gestionar el carbono como tecnología de mitigación del cambio climático y con fines combinados para ser aplicados en suelos agrícolas, mejorando sus condiciones físicas y químicas y aumentando la productividad (Scholz *et al.*, 2014). Son utilizados en la agricultura y derivan de una gran diversidad de biomásas que presentan alta variación física y química. El biocarbón derivado de residuos de maíz, tiene una tasa de transformación rápida (2 h a 500 °C) y puede tener capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 14.4 cmol kg⁻¹ a pH 7 (Chen, Lin, Rizwan, Zhao y Li, 2019). Los beneficios del biocarbón en la agricultura han sido sintetizados por Purakayastha *et al.* (2019), quienes sugieren que mejora la densidad aparente del suelo, favorece la agregación de las partículas minerales, aumenta la porosidad, la retención de agua, la conductividad hidráulica y la infiltración. Respecto a la química del suelo, modifica el pH y acrecienta la disponibilidad de los nutrientes, eleva la capacidad de intercambio catiónico, manteniendo en mayor cantidad y durante mayor tiempo los nutrientes de forma disponible para las plantas, reduce la lixiviación al absorberlos sobre su superficie y favorece la absorción por las raíces (Kätterer *et al.*, 2019). La aplicación del biocarbón ha mostrado una marcada influencia en la movilización-inmovilización de nutrientes y acelera las tasas de mineralización y nitrificación del N, debido a los cambios que provoca

en la actividad y composición de la microbiota edáfica (Nelissen *et al.*, 2012). Después de aplicar biocarbón se ha observado mayor disponibilidad del fósforo debido al incremento del pH y por ser una fuente de P soluble y extractable; además de interactuar con otros elementos responsables de formar complejos con el fósforo (Glaser y Lehr, 2019). Nelissen *et al.* (2012) sugieren que acelera la transformación del nitrógeno en el corto plazo, y de este modo, aumenta la biodisponibilidad para las plantas. Aumenta la disponibilidad de nitratos, principalmente en suelos ácidos, pero también se ha observado que en el corto tiempo (<1 mes), se reduce el nitrógeno inorgánico del suelo y posteriormente se da un incremento debido posiblemente al C del biocarbón; siendo lo anterior, un efecto multifactorial aún no comprendido completamente (Nguyen *et al.*, 2017). Las partículas de biocarbón, proporcionan superficies reactivas donde los iones N y P se retienen en los sitios de intercambio y en donde son transformados por la biomasa microbiana del suelo, modulando la disponibilidad de N y P para los cultivos (Gul y Whalen, 2016). Algunos autores sugieren que el N y el contenido de agua, son los dos factores clave a nivel mundial para la producción de maíz (Li *et al.*, 2019), siendo el biocarbón un producto que potencializa ambos factores en suelos agrícolas. Kätterer *et al.* (2019) sugieren que la adición constante durante diez años de biocarbón en suelos de Kenia, generó un incremento de 1.17 Mg ha⁻¹ de grano, con respecto al testigo regional. En sitios bajo cultivos convencionales por más de 80 años y en donde la productividad se ha reducido en 66%, se observó un aumento significativo en la producción después de la enmienda (Kimetu *et al.*, 2008). Por todo lo anterior, el objetivo planteado para el presente estudio fue evaluar el efecto del biocarbón en el rendimiento y la respuesta de algunas variables agronómicas de un maíz comercial en Maravatío, Michoacán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El estudio se realizó en el año de 2018 en una parcela ubicada en la comunidad de Pomoca, municipio de Maravatío Michoacán, en las coordenadas 19° 52' 54.23" N y 100° 17' 53.14" O a 2057 m de altitud. El suelo es un Vertisol Mázico (Pélico) según INEGI (2000); de acuerdo con su clasificación el horizonte superficial presenta una estructura masiva y

consistencia dura a bastante dura, lo que puede generar problemas para su laboreo (Nachtergaele, Spaargaren, Deckers y Ahrens, 2000). El clima es del tipo templado subhúmedo con lluvias en verano temperatura promedio de 17.9 °C y precipitación de 924 mm anuales, la clave climática es (A)Cb(w₁)(w)(e)g (García, 2004).

Diseño del Experimento

El diseño experimental consistió en el agrupamiento de unidades experimentales homogéneas en cuatro bloques completos al azar, con dos tratamientos y un control; cada unidad experimental fue de 9 m². Los tratamientos consistieron en un control 0% (T0) y tasas de biocarbón, al 1% (T1) y 2% (T2) a razón de 9.2 Mg ha⁻¹ y de 18.4 Mg ha⁻¹, respectivamente. Las dosis fueron calculadas con base en el peso del suelo seco partiendo de la densidad aparente de la capa arable (0.92 g cm⁻³), por el método del cilindro. El biocarbón se obtuvo a partir de biomasa de olotes de maíz, fabricado en un reactor de pirólisis rústico modificado (Takolpuckdee, 2014) y construido con un tambo de acero de 200 L. Los tiempos de transformación para 15 kg de biomasa, fueron de 40 a 50 minutos y la tasa de recuperación del biocarbón fue de 20 a 25%.

Manejo Agronómico del Cultivo

El maíz cultivado fue un híbrido comercial denominado Berrendo¹ de Asgrow[®] de grano blanco proveniente de una cruz triple y de ciclo intermedio. La preparación del terreno consistió en un sistema convencional de la región, con un riego por inundación trece días antes de realizar un rastreo cruzado con tractor (John Deere[®]) y en donde se incorporó el biocarbón hasta una profundidad de 10 cm. Posteriormente se surcó y se sembró manualmente durante la primera semana de mayo de 2018, con una densidad de siembra de 80 000 plantas por hectárea. Un segundo riego rodado fue realizado inmediatamente después de la siembra, seguido de un tercero diez días después de la misma, y el último riego, se aplicó en el mes de junio del mismo año y posterior a realizar la primera escarda con azadón. En el mes de julio y noviembre se realizaron la segunda y tercera escarda, respectivamente. El manejo de organismos plaga se

realizó con la aplicación de cipermetrina (Combat 20[®]) y clorpirifos etil (Lorsban[™] 480 EM). La dosis de fertilización para todas las parcelas fue de 200_N-80_P-150_K-30_S, usando como fuentes químicas; urea, cloruro de potasio, MAP y sulfato de amonio respectivamente. En la siembra se realizó la primera aplicación de N, equivalente a la tercera parte, y el total de P, K y S. La segunda y la tercera aplicación de N se realizaron después de 30 días de la emergencia del cultivo y en la etapa fenológica vegetativa tardía (VT) del cultivo, respectivamente.

Variables Agronómicas Medidas

Se consideraron 16 plantas por tratamiento para la medición de las variables agronómicas de las líneas centrales de cada subparcela. Las variables fueron medidas con base en los manuales del CIMMYT (CIMMYT, 1995; Castellanos-Navarrete *et al.*, 2017). El rendimiento del maíz se calculó a partir del peso del grano húmedo y seco, cosechado al momento en que inicia la etapa de vejez del maíz, después de alcanzar su madurez fisiológica. El peso del grano se ajustó a humedad comercial de 14.5%. Las mazorcas se separaron de los tallos y se pesaron en campo con báscula granataria (Camry[®]); posteriormente se desgranaron para pesar las fracciones correspondientes al peso de granos y olotes. La longitud de la mazorca y de los olotes fue medida con regla y su diámetro con un vernier (Pretul[®]). La longitud de la planta se midió de la base hasta donde comienza a dividirse la espiga usando una cinta métrica (Pretul[®]). El peso seco de la planta corresponde a esta, desde su base sin considerar las mazorcas. Para la profundidad y longitud de raíz, se cavó con pala para extraer la raíz y se midió su longitud y desarrollo lateral.

Análisis Estadístico de la Información

Se realizó una prueba de la normalidad de los datos usando el modelo de Shapiro-Wilk para muestras pequeñas. El análisis de varianza fue de una vía y la comparación de las medias con la técnica de Tukey-Kramer y un alfa de 0.05 utilizando el programa Minitab versión 5.

¹ Berrendo, híbrido de cruz triple, excelente vigor y germinación (Asgrow[®]). Consultado el 8 de noviembre, 2020, desde <https://www.asgrow.com.mx/es-mx/productos/maiz/product-detail-template.html/berrendo-bajo.html>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se encontró que el efecto del biocarbón en T1 y T2, incrementó el rendimiento de maíz en 1.2 Mg ha⁻¹ (7%) y T2 1 Mg ha⁻¹ (6%) respectivamente, comparado con el control (T0) (Cuadro 1). Resultados similares fueron reportados por Kätterer *et al.* (2019) en maíz cultivado en Kenia con un incremento de 1.17 Mg ha⁻¹ de grano, con respecto al testigo regional. Kimetu *et al.* (2008) reportaron un acrecentamiento en la productividad del maíz de 2.2 Mg ha⁻¹ para el primer año y de 2.9 Mg ha⁻¹ en el segundo, respecto al control, como respuesta a la aplicación de biocarbón en suelos fuertemente degradados. En Kenia, Kätterer *et al.* (2019) observaron un aumento del pH en el suelo con una mayor disponibilidad y absorción del fósforo y N por la planta, así como un aumento en la capacidad de retención de agua del suelo derivado de las enmiendas con biocarbón; lo anterior, podría explicar el incremento del rendimiento de maíz al mejorar

la absorción radicular de los nutrientes, movilización de micronutrientes poco disponibles del suelo y acrecentar el intercambio catiónico del suelo; así como a la mayor disponibilidad de agua y aumento en la porosidad del suelo en presencia del biocarbón, procesos que se ven reflejados directamente en la producción y son explicados ampliamente en la literatura científica (Eduah, Nartey, Abekoe, Breuning y Andersen, 2019; Glaser y Lehr, 2019; Li *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2021).

El peso total de la mazorca en este estudio, presentó la siguiente tendencia, T1 > T2 > T0 (Cuadro 1), siendo estadísticamente diferentes ($P = 0.038$); sin embargo, el peso de grano por planta, por sí solo, no fue estadísticamente diferente ($P = 0.191$) y concuerda con lo reportado por Steiner *et al.* (2008), quienes indican no haber encontrado suficiente evidencia estadística respecto al peso del grano, pero encontraron, mayor concentración de nitrógeno en los tratamientos con biocarbón respecto a los fertilizados químicamente. Lo anterior, podría estar relacionado con la mayor disponibilidad del nitrógeno en el suelo (Li *et al.*, 2019;

Cuadro 1. Variables agronómicas evaluadas como respuesta a la aplicación de biocarbón en el suelo.
Table 1. Agronomic variables evaluated as a response to the application of biochar in the soil.

Variable de respuesta	Promedios [†]		
	T0	T1	T2
Rendimiento (Mg ha ⁻¹) [‡]	15.4	16.6	16.4
Peso de mazorca (g)	338.4 (41.5) b	377.5 (47.2) a	374.4 (49.8) a
Peso del grano por planta (g)	292.8 (35.6) ns	315.2 (37.1) ns	312.4 (39.9) ns
Longitud de mazorca (cm)	19.8 (1.6) ns	21.1(1.9) ns	19.8 (1.7) ns
Diámetro de mazorca (cm)	5.5 (2.4) b	5.6 (2.4) a	5.7 (2.6) a
Peso del olote (g)	54.7 (9.4) ns	61.4 (10.9) ns	59.4 (13.2) ns
Diámetro del olote (cm)	3.0 (0.17) ns	3.1 (0.16) ns	3.1 (0.16) ns
Altura de planta (cm)	272 (17.3) ns	265 (20.7) ns	280 (16.6) ns
Diámetro del tallo (cm)	1.7 (0.27) b	1.9 (0.22) a	1.9 (0.21) a
Peso seco de la planta (g)	391.7 (117.0) ns	416.3 (141.5) ns	396.9 (111.3) ns
Profundidad de raíz (cm)	53.0 (8.0) ns	51.3 (7.9) ns	54.2 (9.2) ns
Longitud lateral de raíz (cm)	22.7 (3.5) a	24.03 (3.39) a	27.9 (6.0) b

[†] Letras diferentes en las filas indican diferencias significativas de las medias por Tukey-Kramer y un alfa de 0.05 (n = 16); los valores entre paréntesis indican la desviación estándar de los datos. [‡] El rendimiento se ajustó a valores de la humedad comercial (14.5 %).

[†] Different letters in rows indicate significant differences of means by Tukey-Kramer, and an alpha of 0.05 (n = 16). Values in parentheses indicate the standard deviation. [‡] The yield was adjusted to commercial humidity values (14.5%).

Eduah *et al.*, 2019) e indica una mejor nutrición de la planta (Kätterer *et al.*, 2019). Otros autores reportan que se presentaron diferencias significativas en el peso de grano por planta después de aplicar biocarbón al suelo (Onasanya *et al.*, 2009).

La longitud de la mazorca presentó una tendencia, $T1 > T2 = T0$ ($P = 0.59$), con una ligera tendencia de T1 a producir mazorcas largas, con respecto al resto de los tratamientos. Referente al peso del olote, la tendencia fue en el siguiente orden, $T1 > T2 > T0$, sin presentar diferencias estadísticamente significativas ($P = 0.234$), mismo caso que para el diámetro del olote ($P = 0.521$), con una ligera tendencia $T1 = T2 > T0$. La literatura sugiere que el incremento en el tamaño de la mazorca y del olote, se debe a la respuesta de la planta por la reducción de la densidad de siembra (Loesch, Stark y Zuber, 1976; Taylor, Hedges y Whelan, 2009).

La altura de la planta fue similar entre los tratamientos ($P = 0.089$); sin embargo, T1 fue ligeramente menor a la altura del híbrido de maíz, reportada en la ficha técnica de 270 a 295 cm (Berrendo¹). En cuanto al diámetro de tallo, T1 y T2 fueron mayores con respecto a T0 ($P = 0.037$), siendo similar a lo reportado por Głodowska, Husk, Schwinghamer y Smith (2016) y Tanure *et al.* (2019), quienes sugieren, que el tallo de maíz fue significativamente más grueso con respecto al control, en plantas expuestas al biocarbón; sin embargo, Situmeang, Adnyana, Netera-Subadiyasa y Merit (2015) no encontraron diferencias en el grosor del tallo para un control y tres dosis de biocarbón (0, 5, 10 y 15 Mg ha⁻¹).

El peso seco de la planta no presentó diferencias significativas ($P = 0.923$) y contrasta con lo reportado por Głodowska *et al.* (2016), quienes encontraron diferencia en esta variable agronómica. La profundidad de la raíz no fue estadísticamente distinta entre los tratamientos y el control ($P = 0.631$) y es similar con lo que reporta Onasanya *et al.* (2009) y Głodowska *et al.* (2016). Por el contrario, el desarrollo lateral de las raíces fue significativo, $T2 > T1 = T0$ ($P = 0.005$), lo que sugiere una mayor área de exploración de las raíces. La literatura reporta con frecuencia, la relación existente entre el aumento en el desarrollo y peso de la raíz después de la aplicación del biocarbón (Tanure *et al.*, 2019) y atribuyen su desarrollo prominente a los cambios físicos, químicos y biológicos que genera el biocarbón en el suelo. Otros autores sugieren que el biocarbón favorece que la raíz tenga mayor área de

exploración por el aumento de la disponibilidad de nutrientes y adquiera mayor cantidad de nutrientes (Głodowska *et al.*, 2016; Gul y Whalen, 2016; Yang *et al.*, 2021) y se reflejan en la concentración de los nutrientes en el grano (Kimetu *et al.*, 2008). Para la planta de maíz, también se ha atribuido que el cambio de la arquitectura radicular se debe a la disminución de la densidad aparente del suelo, aumento en la capacidad de retención de agua y mejor suministro del líquido en las etapas de estrés hídrico (Kätterer *et al.*, 2019).

En este estudio, los efectos del biocarbón en el desarrollo de la planta de maíz no son consistentes en todos los casos con la literatura. Tanure *et al.* (2019) sugieren que los resultados reportados en la literatura no son consistentes, sino por el contrario, son altamente variables y deben de considerarse el tipo o variedad de planta de maíz, propiedades físicas y químicas del biocarbón y la tasa de aplicación; así como a las características del suelo y condiciones ambientales como luz, temperatura, CO₂, concentración y disponibilidad de nutrientes y agua en donde se esté aplicando la enmienda. Por otro lado, Kätterer *et al.* (2019) y Li *et al.* (2019), sugieren que la respuesta de las plantas a la aplicación de la enmienda se presenta después del segundo año, tiempo para que el biocarbón reaccione con el suelo. Finalmente, las tareas pendientes a futuro son: probar diversas dosis de biocarbón que sean fácilmente alcanzables por los productores, evaluar los efectos del biocarbón a mediano y largo plazo, medir los cambios físicos y químicos del suelo después de la enmienda y valorar la absorción de nutrientes por la planta a través de análisis foliares.

CONCLUSIONES

La aplicación de biocarbón a tasas de 1 y 2% presentó un efecto positivo en el rendimiento de maíz de 1.2 y 1 Mg ha⁻¹ respectivamente, con respecto al control (T0). El peso de la mazorca, de grano por planta, de olote, de peso seco de la planta, longitud de mazorca y el desarrollo lateral de la raíz, presentaron la siguiente tendencia, $T1 > T2 > T0$; el resto de las variables no presentaron tendencias claras a la aplicación del biocarbón. Se concluye que el biocarbón a una tasa de aplicación de 1 y 2%, son una alternativa viable para aumentar la producción de maíz en las áreas similares a donde se llevó a cabo el estudio de la región Oriente del estado de Michoacán.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia, en esta sección.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: L.E.M.O. y A.M.S., como parte de su tesis profesional. Metodología: A.M.S., L.E.M.O. y A.S.D. Toma de datos en campo: A.M.S. Elaboración de biocarbón e implementación en campo: A.M.S. Análisis en laboratorio: L.E.M.O. y V.N.O. Validación y revisión de datos: A.M.S., L.E.M.O. y A.S.D. Análisis estadístico: A.M.S. y L.E.M.O. Escritura: A.M.S., L.E.M.O., A.S.D. y V.N.O. Preparación del borrador original: A.M.S. y L.E.M.O. Administración del proyecto: L.E.M.O. y A.S.D.

FONDOS

Fondo de investigación científica del Tecnológico Nacional de México, proyecto: Biocarbón para el incremento de la producción de maíz en el valle Morelia-Queréndaro. Convocatoria 2019.

AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de edafología de la Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán coordinado por Verónica Núñez Oregel. A los productores por el valioso apoyo en campo.

LITERATURA CITADA

- Castellanos-Navarrete, A., Chocobar-Guerra, A., Cox, R., Fonteyne, S., Govaert, B., Jespers, N.,... Verhulst, N. (2017). *Protocolos para mediciones de plantas en las plataformas de investigación*. Folleto, consultado el 7 de noviembre, 202, desde <https://repository.cimmyt.org/handle/10883/18900>
- Chen, X., Lin, Q., Rizwan, M., Zhao, X., & Li, G. (2019). Steam explosion of crop straws improves the characteristics of biochar as a soil amendment. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(7), 1486-1495. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62573-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62573-6)
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo) (Ed.). (1995). *Manejo de los ensayos e informe de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT*. México, D.F.: CIMMYT.
- Eduah, J. O., Nartey, E. K., Abekoe, M. K., Breuning-Madsen, H., & Andersen, M. N. (2019). Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures. *Geoderma*, 341, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.016>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5a ed.). México, D.F.: Instituto de Geografía, UNAM.
- Glaser, B., & Lehr, V. I. (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 9, 9338. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>
- Głodowska, M., Husk, B., Schwinghamer, T., & Smith, D. (2016). Biochar is a growth-promoting alternative to peat moss for the inoculation of corn with a pseudomonad. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0356-z>
- Gul, S., & Whalen, J. K. (2016). Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.08.001>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2000). Edafología. Espacio y datos de México. Consultada el 8 de noviembre, 2020, desde <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Kätterer, T., Roobroeck, D., Andrén, O., Kimutai, G., Karlton, E., Kirchmann, H.,... Röing de Nowina, K. (2019). Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize-soybean rotations over 10 years in sub-humid regions of Kenya. *Field Crops Research*, 235, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.015>
- Kimetu, J. M., Lehmann, J., Ngoze, S. O., Mugendi, D. N., Kinyangi, J. M., Riha, S.,... Pell, A. N. (2008). Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems*, 11(5), 726-739. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9154-z>
- Li, Y., Li, Z., Cui, S., Chang, S. X., Jia, C., & Zhang, Q. (2019). A global synthesis of the effect of water and nitrogen input on maize (*Zea mays*) yield, water productivity and nitrogen use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.018>

- Loesch, P. J., Stark, C. F., & Zuber, M. S. (1976). Effects of plant density on the quality of cobs used for corncob pipes. *Crop Science*, *16*(5), 706-709. <https://doi.org/10.2135/cropsci1976.0011183X001600050027x>
- Nachtergaele, F. O., Spaargaren, O., Deckers, J. A., & Ahrens, B. (2000). New developments in soil classification: World Reference Base for Soil Resources. *Geoderma*, *96*(4), 345-357. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00023-9)
- Nelissen, V., Rütting, T., Huygens, D., Staelens, J., Ruyschaert, G., & Boeckx, P. (2012). Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *55*, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.05.019>
- Nguyen, T. T. N., Xu, C.-Y., Tahmasbian, I., Che, R., Xu, Z., Zhou, X., Wallace, H. M., & Bai, S. H. (2017). Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma*, *288*, 79-96. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.004>
- Onasanya, R. O., Aiyelari, O. P., Onasanya, A., Oikeh, S., Nwilene, F. E., & Oyelakin, O. O. (2009). Growth and yield response of maize (*Zea mays* L.) to different rates of nitrogen and phosphorus fertilizers in Southern Nigeria. *World Journal of Agricultural Sciences*, *5*(4), 400-407.
- Purakayastha, T. J., Bera, T., Bhaduri, D., Sarkar, B., Mandal, S., Wade, P.,... Tsang, D. C. W. (2019). A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security. *Chemosphere*, *227*, 345-365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.170>
- Scholz, S. B., Sembres, T., Roberts, K., Whitman, T., Wilson, K., & Lehmann, J. (2014). *Biochar systems for smallholders in developing countries. Leveraging current knowledge and exploring future potential for climate-smart agriculture*. Washington, DC, USA: The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-9525-7>
- Situmeang, Y. P., Adnyana, I. M., Netera-Subadiyasa, I. N., & Merit, I. N. (2015). Effect of dose biochar bamboo, compost, and phonska on growth of maize (*Zea mays* L.) in dry land. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, *5*(6), 433-439. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.5.6.609>
- Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Blum, W. E. H., & Zech, W. (2008). Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *171*(6), 893-899. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625199>
- Takolpuckdee, P. (2014). Transformation of agricultural market waste disposal to biochar soil amendments. *Procedia Environmental Sciences*, *20*, 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.010>
- Tanure, M. M. C., Costa, L. M. da, Huiz, H. A., Fernandes, R. B. A., Cecon, P. R., Pereira Junior, J. D., & Luz, J. M. R. da. (2019). Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*, *192*, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.007>
- Taylor, J., Hedges, S., & Whelan, B. (2009). *How long should your corn-cob pipe be: modeling yield*quality interactions in sweet corn*. In 7th European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment Conference (EFITA 09) - The Joint International Agriculture Conference (pp. 411-417). The Netherlands: Wageningen Academic Publishers.
- Yang, F., Sui, L., Tang, C., Li, J., Cheng, K., & Xue, Q. (2021). Sustainable advances on phosphorus utilization in soil via addition of biochar and humic substances. *Science of The Total Environment*, *768*, 145106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145106>