

Prototipo autotérmico móvil para producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate

Mobile autothermic prototype for biochar production using biomass of avocado crop byproducts

Lenin Ejecatl Medina Orozco^{1‡} e Iván N. Medina Orozco²

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 responsable (leninmed@gmail.com)

² Estudiante de la Universidad Virtual del Estado de Michoacán (UNIVIM). Calle Defensor de Chapultepec 1175. Colonia Reserva de Guadalupe. 58147 Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

El estado de Michoacán, México, es el principal productor mundial de aguacate, con un impacto social y económico en función de la superficie cultivada. Productos secundarios de esta actividad, son los esquilmos agrícolas derivados de las podas de mantenimiento de los árboles. El biocarbón (*biochar*) de subproductos de aguacate, se vislumbra como una alternativa económica, ambiental y socialmente viable, para producir biocarbón en grandes volúmenes, sin extracción de maderas de bosque y selvas prístinas. El objetivo del presente estudio, fue construir y evaluar el desempeño en condiciones de campo, de un prototipo de biocarbón-pirólisis autotérmico y móvil, con volumen útil de 1.7 m³ de biomasa triturada. El equipo fue construido de acero inoxidable, para darle un periodo de vida útil de 7 años bajo condiciones intensivas de uso, con movilidad dentro de los campos agrícolas y auto térmico para no depender de una fuente de calor externa. El equipo fue de bajo costo comparado con equipos comerciales (\$ 700 000.00 pesos MN) y con un potencial futuro en la cogeneración de energía. La principal variable en el costo de fabricación es el precio del acero inoxidable en el mercado. El equipo reportó una tasa de conversión de biomasa a biocarbón, en condiciones de campo, de entre 300 y 400 kg por día, con una tasa promedio de recuperación del 16% en biocarbón. Las principales variables en la transformación de la biomasa a biocarbón fueron: humedad, el tamaño de la astilla y condiciones

atmosféricas. Se encontró una Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de 46 Cmol_c kg⁻¹ y pH 10.25. El equipo transformó satisfactoriamente la biomasa de aguacate y el biocarbón presentó características adecuadas para su uso en suelos volcánicos.

Palabras clave: pirólisis lenta, acondicionadores del suelo, tierra negra.

SUMMARY

The state of Michoacán, Mexico, is the world's largest producer of avocado. The social and economic impact of this crop depends on the area under cultivation. By-products of this activity are derived from pruning for tree maintenance. Using avocado byproducts is seen as an economically, environmentally and socially viable alternative for producing biochar in large volumes, without extracting timber from forests and pristine jungles. The objective of the present study was to build a mobile autothermic biochar-pyrolysis prototype, with a useful volume of 1.7 m³ of crushed biomass and evaluate its performance in field conditions. The equipment was built of stainless steel to give it a useful life of 7 years of intensive use, with mobility within the agricultural fields. It is autothermic so as not to depend on an external heat source. The equipment was low-cost compared to commercial equipment (\$ 700 000.00 MN pesos) and has future potential in cogeneration of energy. The main variable in manufacturing cost is the market price of stainless

Cita recomendada:

Medina Orozco, L. E. e I. N. Medina Orozco. 2018. Prototipo autotérmico móvil para producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoamericana* 36: 121-129.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>

Recibido: enero de 2017. Aceptado: marzo de 2018.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 36: 121-129.

steel. The equipment reported a conversion rate of biomass to biochar, under field conditions, of 300 to 400 kg per day, with an average recovery rate of 16% in biochar. The main variables in the transformation of biomass to biochar were moisture, size of chips and atmospheric conditions. A Cation Exchange Capacity (CEC) of 46 Cmol_c kg⁻¹ and pH 10.25 were found. The equipment successfully transformed avocado biomass, and the biochar had suitable characteristics for volcanic soils.

Index words: slow pyrolysis, soil conditioners, terra preta.

INTRODUCCIÓN

El estado de Michoacán, México, es el principal productor de aguacate del país y del mundo, por las condiciones agroecológicas que reúne, su clima y la topografía del Cinturón Volcánico Trans mexicano que favorecen la producción del cultivo (Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010). El cultivar Hass ocupa una superficie superior a las 127 000 ha según datos oficiales (SIAP, 2016). Lo anterior, representa un impacto significativo en la economía, en lo social y ambiental. La producción promedio anual de aguacate, representa aproximadamente un millón trescientas mil toneladas. El cultivo en el estado, representa el 36.5% a nivel mundial y el 74% nacional, lo cual, lo ubica como el principal productor del mundo. Este cultivo genera más de 50 000 empleos directos e indirectos (APEAM, 2013). El gradiente altitudinal de producción del aguacate, varía de los 1300 a 3600 msnm, los suelos predominantes son Andosoles (82%) y Acrisoles (5%), el resto lo componen otros suelos (13%) (Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010; Chávez-León *et al.*, 2012). El municipio con mayor superficie cultivada en el estado, es Tancítaro (Salazar-García *et al.*, 2005). Los suelos derivados de ceniza volcánica de la región, presentan retención de fósforo (Alcalá *et al.*, 2009), siendo un factor para que éste cultivar, sea altamente demandante de fertilizante fosfatado (González-Durán y Salazar-García, 2007; Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010).

En otro orden de ideas, a escala nacional se ha documentado una acelerada tasa de deforestación y cambio de uso del suelo. En el estado de Michoacán la deforestación de la vegetación nativa es un efecto negativo causado por la expansión del cultivo de aguacate (Velázquez *et al.*, 2002 y 2007). En la Cuenca

del Río Cupatitzio; por ejemplo, las áreas ocupadas por la agricultura de temporal y riego, eran de 34.8% en el año de 2003 y para el año de 2008 creció un 7.8% (42.6%) (Bravo-Espinosa *et al.*, 2012), además de la extracción de biomasa como fuente de energía (leña) (González, 2007).

Por otra parte, el cultivo del aguacate, requiere de podas de mantenimiento para mantener o incrementar la productividad o cuando es necesario recuperarla por vejez de los árboles (Thorp y Stowell, 2001; González-Durán y Salazar-García, 2007) e incrementar paulatinamente, la densidad de la plantación, al reducir el tamaño del árbol y de su copa (Gardiazabal *et al.*, 2011). En este mismo sentido, las podas de mantenimiento de los árboles, generan residuos agrícolas que pueden ser aprovechados en la conversión a biocarbón. Existe poca información sobre el volumen de esquilmos que se generan derivados de esta actividad cultural. Fuentes-Talavera *et al.* (2011), estiman una producción de entre 4.75 a 7.36 m³ por año de madera, considerando un 10% de árboles en poda cada año en una huerta y una densidad de 125 árboles por hectárea.

La producción de biocarbón o (*biochar*), ha sido declarada como una tecnología viable en países en vías de desarrollo, por el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas; sin embargo, la tecnología que se encuentra disponible en el mercado es limitada; principalmente, para la transformación de altos volúmenes de biomasa en condiciones de campo y que tengan la facilidad de movilidad en campos agrícolas. El tema central del debate entonces, consiste en el balance entre eficiencia y economía de los equipos de biocarbón-pirólisis (Laird *et al.*, 2009). Los equipos disponibles en el mercado, son fijos y algunos autores sugieren que el transporte de la materia prima (biomasa) y del material terminado (biocarbón), es el principal obstáculo para la rentabilidad económica del sistema de biocarbón-pirólisis (Laird *et al.*, 2009; Roberts *et al.*, 2010). Por el contrario, equipos rústicos, de fabricación artesanal, son de tamaño pequeño (~ 0.2 m³) elaborados para pequeños productores, y tienen la desventaja de tener tasas de conversión de biomasa en pequeños volúmenes, de entre 1.15 a 3.33 toneladas de madera o residuos agrícolas por año (Scholz *et al.*, 2014), siendo una limitante en cultivos de aguacate o en sistemas agrícolas, donde se producen altos volúmenes de residuos agrícolas (Fuentes-Talavera *et al.*, 2011; Borja *et al.*, 2013).

Como alternativas a los procesos de degradación que ha ocasionado el cambio de uso del suelo forestal a agrícola (aguacate) (Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010; Chávez-León *et al.*, 2012), la literatura sugiere al biocarbón vegetal, como una alternativa económica y ambientalmente viable, para revertir los procesos de degradación edáfica y captura de carbono en suelos tropicales (Sohi *et al.*, 2009; Mekuria y Noble, 2013), y para remover contaminantes del suelo y del agua (Ahmad *et al.*, 2014). El biocarbón es un carbón enriquecido, que se obtiene cuando la biomasa es quemada en un contenedor cerrado con aire limitado (oxígeno) durante la combustión, generando un proceso denominado pirólisis (Lehmann *et al.*, 2006; Manyà, 2012). Se cuenta con estimaciones (Harley, 2010), que sugieren que alrededor del 70% del carbono orgánico se pierde cuando los suelos son disturbados, dando como resultado severas limitaciones nutricionales y condiciones físicas del suelo. Entre las principales ventajas del uso de biocarbón se han reportado las siguientes: 1) Físicas; decrece la densidad aparente, incrementa la infiltración y reduce la erodabilidad. 2) Nutricionales; incrementa la producción, libera lentamente los nutrientes, estabiliza la materia orgánica del suelo, incrementa la actividad microbiana, sirve de hábitat para micorizas. 3) Toxicidad; cuenta con una carga alcalina, alta afinidad para retención del sodio, alta superficie y capacidad de intercambio catiónico para retención de metales pesados (Harley, 2010).

Por otro lado, el secuestro de carbono es clave en la reducción de GEI (Gases de Efecto Invernadero), comparado con otras formas de remoción de CO₂. Por lo cual, la estrategia del uso de biocarbón es una alternativa fundamental en la mitigación ante el cambio climático, principalmente porque no solamente tiene un impacto positivo en el ambiente, sino porque presenta un potencial para incrementar la productividad y mitigar el detrimento de las propiedades edáficas, por lo cual, puede ser fácilmente adoptado por los productores (Harley, 2010).

Actualmente en la bibliografía científica, se pueden encontrar numerosos datos acerca de los posibles efectos de la aplicación del biocarbón sobre el suelo. No obstante, el nivel de conocimiento es aún muy reciente y a menudo los resultados son muy variables y dependen del tipo de estudio y ecosistema evaluado (Sohi *et al.*, 2009). Desafortunadamente, los estudios sobre biocarbón y el potencial para restaurar suelos

en México, ha sido poco explorado, pero se vislumbra como una alternativa viable para este propósito (Velázquez-Duran *et al.*, 2015; Escalante *et al.*, 2016).

El objetivo del presente estudio, fue el diseño, construcción y evaluación del desempeño en condiciones de campo, de un prototipo de biocarbón-pirólisis auto térmico y móvil.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de Estudio

Los ensayos de pirólisis se realizaron en la huerta del productor co-investigador, Luis Zamora Cuevas, en el rancho El Cuate, municipio de Tancítaro, una de las zonas más productivas y antiguas de cultivos de aguacate. Los ensayos se llevaron a cabo durante los años 2014 y 2015 (Figura 1).

El clima regional según Köppen modificado por García (1988) es del tipo (A)Cb (w₂)(w)(i) g, semicálido con verano largo y fresco, el más húmedo de los subhúmedos, régimen de lluvias de verano sin presencia de canícula; baja precipitación invernal, con oscilación isotermal y marcha tipo ganges. La precipitación promedio regional es de 1566 mm anuales (elaboración propia a partir de datos del Clicom, 2003 para un periodo comprendido de 1965 a 2003). Las coordenadas geográficas centrales de la huerta se encuentran entre los paralelos 19° 27' 59.71" N y 102° 17' 05.01" O y altitud de 2897 m.

Características de los Suelos en la Huerta de Ensayo

La huerta donde se fabricó el biocarbón, tiene más de 30 años de manejo y representa las condiciones de un huerto maduro de aguacate. El suelo es derivado de cenizas volcánicas, con las siguientes propiedades en los primeros 20 cm de profundidad: textura franca arenosa, arcillas < 5%, densidad aparente promedio de 0.93 g cm⁻³ y densidad de partículas de 1.9 g cm⁻³. La porosidad es de 47% en promedio. Es moderadamente ácido (6 pH). Cationes; Ca²⁺ (10.6 Cmol_c kg⁻¹), Mg²⁺ (2.6 Cmol_c kg⁻¹), Na⁺ (0.23 Cmol_c kg⁻¹) y K⁺ (1.62 Cmol_c kg⁻¹) con una saturación de bases de 75.5% y una CIC 19 Cmol_c kg⁻¹, contenido de fósforo Bray de 64.1 mg kg⁻¹. Presenta valores altos de carbono orgánico (CO), 3.52% y 15 mg kg⁻¹ de N (NO₃ + NH₄) (Vega-Oregel y Medina-Orozco, 2015).

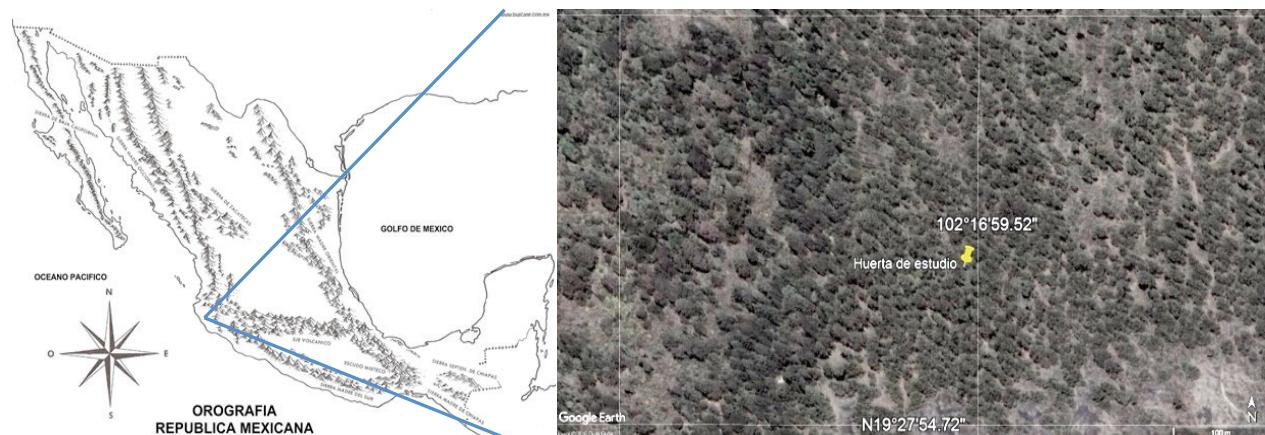


Figura 1. Huerta de aguacate para ensayos de campo.skyscrapercity.com y Google earth 2016.

Fabricación del Equipo de Pirólisis Autotérmico Móvil (PAM)

El proyecto de fabricación del equipo se realizó en dos etapas: 1) se elaboró un prototipo con el mejor diseño teórico posible para la fabricación del biocarbón y 2) derivado de lo anterior, dos equipos fueron fabricados; uno en acero al carbón para realizar los ensayos preliminares y realizar las modificaciones de diseño necesarias. Posteriormente, otro semejante fue construido en acero inoxidable para ensayos controlados y de campo (Figura 2). La capacidad de este prototipo fue de 50 L (0.05 m³), equivalente a ~ 8.6 kg de madera seca al aire (~ 15% de humedad). Los datos de estos ensayos no se discuten en el presente documento, debido a que la finalidad se centró en un equipo de mayores dimensiones para ser competitivo respecto a equipos comerciales.

Una vez obtenido el mejor diseño teórico y haber realizado las modificaciones correspondientes, el equipo se escaló 1:34 veces para el volumen útil. Para el rediseño y dimensionamiento, se tomó en cuenta, para calcular la anchura, la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2014, que regula las dimensiones de los vehículos que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal y no rebasar el ancho permisible. A partir de lo anterior, el equipo fue dimensionado para permanecer fijo sobre la plataforma de un remolque de carga. La capacidad fue de 1.7 m³ de volumen útil, que equivale aproximadamente entre 300 a 400 kg de madera, en función del tamaño de astilla y de la humedad de la misma. El equipo fue construido totalmente en acero inoxidable.

Ensayos de Campo

La biomasa vegetal se obtuvo de la poda de mantenimiento. Las ramas fueron trituradas con una picadora de ramas, obteniendo astillas de aproximadamente 1 pulgada (2.54 cm) de ancho y largo. Se pusieron a secar al sol durante unos 15 días antes de la pirólisis en el equipo. Previo a cada ensayo, se pesó la materia prima o biomasa vegetal y se determinó la humedad con muestras de astillas utilizadas en la fabricación del biocarbón y secadas en laboratorio en un horno a 105 °C durante 24 horas. La temperatura de combustión, se midió con un termómetro infrarrojo Fluke®. Por otra parte, la densidad de la astilla de las podas se estimó por el método de desplazamiento de agua de acuerdo con Valencia y Vargas (1997).

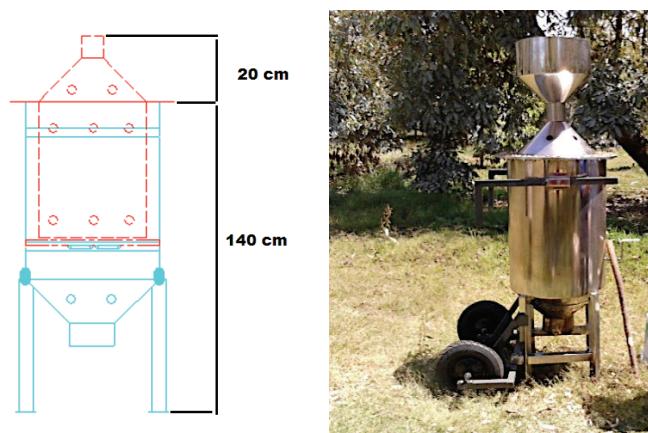


Figura 2. Equipo (PAM) construido en acero inoxidable con volumen útil de 0.05 m³.

El rendimiento del biocarbón fue la diferencia entre el peso de la biomasa verde y el peso del biocarbón.

Análisis de Laboratorio del Biocarbón

A una muestra compuesta obtenida de ensayos del biocarbón ($n = 10$), se le determinaron algunos indicadores químicos; carbono orgánico (%), materia orgánica (%), conductividad eléctrica ($dS\ m^{-1}$) y pH en agua. Adicionalmente muestras de biocarbón comercial, derivado de los ingenios de caña de azúcar y cachaza de caña; se analizaron con fines de comparación. Las muestras fueron proporcionadas por el productor. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de suelos de Apatzingán perteneciente a la Fundación Produce Michoacán A.C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Costos de Fabricación del Equipo de Biocarbón-Pirólisis

El costo de fabricación del equipo de pirolisis presentado en este trabajo fue de \$ 700 000.00 (setecientos mil pesos M.N.). Algunos equipos comerciales fijos, para transformar biomasa a biocarbón, con capacidad de carga de entre 100 kg a 750 kg de biomasa, tienen precios de 7500 francos suizos (\$ 153 000.00 pesos mexicanos) y hasta 75 000 francos suizos (\$ 1 520 000.00 pesos mexicanos), siendo equipos de fabricación suiza (Carbonzero®, 2013¹); en este mismo sentido, equipos de fabricación norteamericana, para transformar 200 kg de biomasa, tienen precios de mercado de \$ 350 000.00 dólares americanos (\$ 7 154 000.00 pesos MN), más un precio adicional de alrededor de \$ 25 000.00 dólares americanos (\$ 511 000.00 pesos MN), por capacitación (Gelwicks, 2013²); otros equipos estáticos rondan el rango de precios entre los \$ 100 000.00 dólares americanos (\$ 2 044 000.00 pesos MN) (EcoTechnologies Group, 2013³). Por lo anterior, el presente prototipo presentó costos competitivos en comparación a cualquier equipo extranjero.

El principal factor de variación del costo del equipo fue el precio del acero inoxidable en el mercado. En este

sentido; por ejemplo, el precio del acero en el mercado, entre el año de 2002 y 2012, fue de entre \$ 187 dólares americanos y hasta \$ 412 dólares americanos, por tonelada métrica. Lo anterior se debe a que los precios del acero se relacionan directamente con la industria de la construcción (Salcedo *et al.*, 2014).

Ventajas de Operación del Prototipo

El modelo presenta serias ventajas con respecto a los reportados en la literatura y por empresas constructoras; entre ellas están las siguientes: a) fácil movilidad en carretera y huertos, por estar sobre un remolque de plataforma convencional; b) no requiere montarse o desmontarse en cada sitio por permanecer fijo sobre la plataforma; c) el equipo es fabricado en acero inoxidable por lo cual puede permanecer a la intemperie; d) se requieren solamente dos operarios para su funcionamiento. Como ventaja adicional futura, tiene potencial para cogenerar energía.

Estimación de la Durabilidad del Equipo

La durabilidad del equipo es determinada por el esfuerzo mecánico del calor que resulta en la corrosión del material. Estudios sobre barras de acero, sugieren una baja tasa de corrosión de la lámina de acero a las temperaturas de trabajo medidas en los ensayos de campo al interior del equipo (600 a 700 °C) (Sáenz *et al.*, 2007); por otra parte, pueden ocurrir fracturas en la soldadura por efecto del calor, algunos autores sugieren una resistencia bajo estas condiciones de temperatura, de hasta 50 000 horas (Barroso *et al.*, 2002). Sobre la base de las consideraciones anteriores, se sugiere, que el equipo podría tener un periodo de vida útil de aproximadamente 7 años bajo un uso intensivo y hasta de 23 años bajo un uso moderado. El primer caso correspondería a un uso de 19 horas diarias durante los 365 días del año. El segundo caso, corresponde a un uso de 8 horas diarias durante el mismo lapso de tiempo. Cabe mencionar entonces, la necesidad de realizar el análisis económico para calcular el tiempo de recuperación de la inversión.

¹ CarbonZero®. 2013. Biochar production technology. <http://www.carbonzero.com>. (Consulta: agosto 8, 2013).

² Gelwicks, J. 2013. (john@gelwicks@gmail.com) abril 2013. Inquiry biochar. Correo electrónico enviado a: lenin medina [mailto:leninmed@gmail.com]. Genesis Industries. 212 Yacht Club Way A-12 Redondo Beach, CA 90277. (310) 392-5050. www.egenindustries.com.

³ EcoTechnologies Group. 2013. The biochar systems biochar 1000. <http://www.biochar-international.org/>. (Consulta: abril 23, 2013).

Fabricación de Biocarbón

La literatura reporta que las condiciones óptimas para obtener biocarbón de alta calidad, es cuando la pirólisis presenta temperaturas de entre 450 a 600 °C. (Sohi *et al.*, 2009). Hechas las consideraciones anteriores, el modelo para fabricar biocarbón, presentó temperaturas ideales internas de entre 360 hasta 700 °C. La temperatura de combustión es dependiente de la humedad de la madera, del tamaño de las astillas y de las condiciones ambientales (humedad atmosférica y velocidad del viento, principalmente) (Figura 3). En relación con este último párrafo, la temperatura del interior del reactor de pirólisis, fue parcialmente controlada regulando la cantidad de aire que puede ingresar al reactor a través de las ventanas (orificios inferiores, Figura 2), durante la combustión, principalmente cuando se presentan ráfagas de viento. Lo anteriormente descrito, se logró ocluyendo parcialmente las ventanas inferiores por donde fluye el aire, lo cual es una de las mejoras en el equipo de 1.7 m³ a partir del prototipo de 0.05 m³.

En este mismo orden, se encontró que los tiempos de transformación de biomasa (madera) a biocarbón, se obtuvieron entre 2 horas como mínimo a 6 horas como máximo, medido en el equipo de 0.05 m³ (8.6 kg), mientras que en el equipo de 1.7 m³, los tiempos variaron de entre 8 horas como mínimo a 19 horas máximo, lo anterior sugiere, una relación directa entre el volumen de biomasa y las tasas de transformación. La variación en el tiempo, de la misma manera que con la temperatura, se asoció a las variables ambientales y características de humedad y tamaños de astilla presentados por la madera. Por lo tanto, estas características determinan en conjunto, la carbonización completa y tiempo de

conversión de biomasa a biocarbón. Cabe mencionar, por lo tanto, que otros carbones fabricados de manera artesanal, podrían no tener la calidad deseable para la restauración de los suelos.

En este orden de ideas, la tasa de recuperación de biocarbón, varío de entre el 30 y el 16% con respecto a la biomasa inicial, estos datos, son consistentes con lo encontrado por otros investigadores (Manyà, 2012).

En términos generales, los huertos maduros presentan una densidad de 100 árboles por hectárea, con un volumen de poda por árbol de ~ 1 m³ año⁻¹, con una densidad de la madera promedio de 0.6 Mg m⁻³, lo que sugiere un potencial aprovechable para producción de biocarbón de 600 kg de madera astillada por árbol. Si bien la información es escasa sobre la cantidad de árboles que requieren poda de mantenimiento anual, algunos autores sugieren un porcentaje del 10% del total de árboles (Fuentes-Talavera *et al.*, 2011). Resultando un valor promedio aproximado de 10 m³ ha⁻¹, de biomasa verde, equivalente a 6 Mg ha⁻¹ de astilla de madera secada al aire (aproximadamente 15% de humedad). Considerando una tasa de transformación de 16%, calculada de los ensayos de campo, se tendría un potencial de fabricación de biocarbón, de 0.96 Mg ha⁻¹ en huertos maduros, siendo una tasa alta, comparada con prototipos desarrollados para pequeños productores (Schulz *et al.*, 2014), y que no representan una alternativa viable en sistemas de producción de aguacate.

Por otro lado, Lehman 2007 sugiere una remoción del 20% de CO₂ de la atmósfera utilizando el biocarbón como estrategia de mitigación del cambio climático, en otras palabras, cada tonelada de biomasa convertida a biocarbón podría estar removiendo 20% de su contenido de carbono comparado con su ciclo natural



Figura 3. Transformación de la biomasa vegetal a biocarbón a partir de podas del aguacate.

de descomposición. Lo que sugiere un potencial importante para el país y el estado de Michoacán. Sin embargo, cualquier estimación de captura de carbono, sería vana, debido a que la principal variable para estimar el total de biocarbón producido es la calidad de los biocarbones, las condiciones de pirólisis de cada biocarbón, la naturaleza de la biomasa, entre otras (Sohi *et al.*, 2009) y el número de árboles sometidos a poda por año por hectárea, por lo que resulta necesario investigar a profundidad este tema.

Características Químicas del Biocarbón

De acuerdo con los resultados de laboratorio, el material combustionado, presentó valores inferiores a la unidad porcentual de materia orgánica, lo que sugiere una pirólisis completa, donde el material potencialmente transformable por las bacterias es mínimo y, por lo tanto, el carbón es estable al ataque microbiano (Cuadro 1). En este mismo sentido, el biocarbón presentó características óptimas para ser utilizado en la agricultura; presenta valores de pH alcalino y una CIC alta, útiles para estos suelos ácidos y podría sustituir al encalado agrícola que realizan los productores con la intención de elevar el pH. En este sentido, la literatura reporta que la incorporación de biocarbón aumenta significativamente la CIC total del suelo (Manyà, 2012). Con la ventaja de no retener el fósforo, a diferencia de los amorfos típicos de estos suelos volcánicos que tienen alta retención de fosfatos (Alcalá *et al.*, 2009). Los resultados indican valores altos de pH (Cuadro 1), similares a los encontrados por Escalante *et al.* (2011) para biocarbón derivado de rastrojos de trigo, maíz, aserrín de pino, aserrín y virutas de eucalipto, pero con conductividad eléctrica inferior a los encontrados por los mencionados autores,

lo que indica bajo contenido de sales. De los resultados anteriores, es presumible que al incrementar los niveles de carbono a partir de la incorporación del biocarbón al suelo, se reduzca la necesidad de aportes de fósforo vía fertilizantes químicos y orgánicos, debido a la disminución de la retención de fosfatos en las superficies de carga de las arcillas minerales (amorfos) (Beck *et al.*, 1999), principal elemento limitante en la productividad de suelos agrícolas a nivel mundial (Chien *et al.*, 2011).

Finalmente, los resultados muestran características deseables de biocarbón con uso potencial agrícola, como mejorador de suelo, derivado de los esquilmos de aguacate. Esto se observa en comparación con otros biocarbones comerciales derivados de la caña de azúcar que algunos productores utilizan en el cultivo del aguacate. En este mismo orden de ideas, el biocarbón derivado de caña requiere de energía externa aplicado a las calderas azucareras (Pernalete *et al.*, 2008; Venkatesh y Roy, 2010), a diferencia del equipo autotérmico presentado en el presente estudio. Por lo anterior, el biocarbón obtenido con el prototipo de reactor en nuestra investigación, es razonablemente bueno.

CONCLUSIONES

El diseño y construcción del equipo de pirólisis lenta presentado en este trabajo, con capacidad de convertir entre 300 y 400 kg de biomasa a biocarbón, resultó ser razonablemente adecuado para las condiciones del campo agrícola michoacano en cultivos de aguacate. El prototipo descrito tiene ventajas de movilidad entre huertas de aguacate y no requiere de fuentes externas de calor. Las principales variables que influyen en el tiempo de transformación fueron: la humedad

Cuadro 1. Características de biocarbón obtenido de diferentes residuos de cultivos.

	C.O.	M.O.	C.E.	pH	CIC	P-Olsen
	- - - - - % - - - - -			dS m ⁻¹	Cmolc kg ⁻¹	%
Biocarbón aguacate [†]	0.51	0.89	0.92	10.25	46	1.4
Biocarbón caña [‡]	15.2	26.2	2.17	7.73	26	1.16
Biocarbón caña [§]	10.9	18.8	2.27	7.76	14	0.69
Cachaza de caña	34.5	59.2	3.32	7.71	30	1.24

[†] Granulometría muy gruesa (2 cm); [‡] fina (< 2 mm); [§] granulometría gruesa (2mm – 5 mm). C.O. = carbono orgánico; M.O. = materia orgánica; C.E. = conductividad eléctrica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; P-Olsen = fósforo por el método de Olsen expresado en porcentaje con base en el peso de la muestra.

de las astillas y las condiciones ambientales como ráfagas de viento y humedad del aire. Se alcanzaron temperaturas deseables (360 a 700 °C) para asegurar una transformación lenta de la biomasa a biocarbón con características alcalinas y alta capacidad de intercambio catiónico, que resulta deseable para ser utilizado en suelos volcánicos que presentan retención de fosfatos. Finalmente, se requiere de realizar ensayos en campo para evaluar los beneficios de la aplicación del biocarbón sobre las propiedades y características edáficas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo económico otorgado a través de la Fundación Produce Michoacán A.C. A la Dra. Martha Xóchitl Flores Estrada por el apoyo y críticas al desarrollo del equipo de pirólisis, así como al productor coinvestigador Ing. Luis Zamora Cuevas por las sugerencias y uso de su huerto. Finalmente, a los revisores por sus comentarios y críticas para mejorar el trabajo.

LITERATURA CITADA

- Ahmad, M., A. U. Rajapaksha, J. E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Moha, M. Vithanage, S. S. Lee, and Y. S. Ok. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* 99: 19-33. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071.
- Alcalá, de J. M., C. Hidalgo M. y M. C. Gutiérrez C. 2009. Mineralogía y retención de fosfatos en Andisoles. *Terra Latinoamericana* 27: 275-286.
- APEAM (Asociación de Productores y Empacadores Exportadores de Aguacate de Michoacán). 2013. Estadísticas. Boletín El aguacatero. 15 (69): 20.
- Barroso H., S., M. Carsí C. y F. Peñalba D. 2002. Estudio de la fractura de aceros inoxidables sometidos a soldeo y ensayados bajo fluencia. CONAMET/SAM-Simposio materia 2002. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Beck, M. A., W. P. Robarge, and S. W. Buol. 1999. Phosphorus retention and release of anions and organic carbon by two Andisols. *Eur. J. Soil Sci.* 50: 157-167. doi: 10.1046/j.1365-2389.1999.00213.x.
- Borja B., M., L. Reyes M., J. A. Espinosa G. y A. Vélez. I. 2013. Producción y consumo de rastrojos en México. pp. 12-35. In: L. Reyes Muro, T. C. Camacho-Villa y F. Guevara-Hernández (coord.). Rastrojos: Manejo, uso y mercado en el centro y sur de México. SAGARPA, INIFAP, CIMMYT, CIRNOC. Libro Técnico Núm. 7. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.
- Bravo-Espinosa, M., M. E. Mendoza, T. Carlón-Allende, L. Medina-Orozco, J. T. Sáenz R., and R. Pérez. 2012. Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the trans-mexican volcanic system, Mexico. *Land Degradat. Dev.* doi: 10.1002/ldr.2163.
- Chávez-León, G., L. M. Tapia, M. Bravo, J. T. Sáenz R., H. J. Muñoz F., I. Vidales F., A. Larios G., J. B. Rentería A., F. J. Villaseñor R., J. de la L. Sánchez P., J. J. Alcántar R. y M. E. Mendoza C. 2012. Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate. Campo Experimental Uruapan. CIRPAC. INIFAP. SAGARPA. Libro técnico Núm. 13. ISBN: 978-607-425-825-7.
- Chien, S. H., S. I. Prochnow, S. Tu, and C. S. Snyder. 2011. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: An update review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 89: 229-255. doi 10.1007/s10705-010-9390-4.
- Escalante R., A., G. Pérez G., C. Hidalgo M., J. López C., J. Campo A., E. Valtierra P. y J. D. Etchevers B. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.
- Escalante, A., J. Etchevers, C. Hidalgo, E. García E., J. Collado y J. Campo. 2011. Biocarbón para aumentar la calidad y secuestro de carbono en un suelo de México. pp.413-416. In: F. Paz y R. Cuevas (eds.). 2012. Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México, México. ISBN 978-607-715-085-5.
- Fuentes -Talavera, F. J., J. A. Silva-Guzmán, R. Rodríguez-Anda, M. G. Lomelí-Ramírez, R. Sanjuán-Dueñas, and H. G. Richter. 2011. Strength properties and natural durability of avocado (*Persea americana* Mill.) branch Wood. *Madera y Bosques* 17: 37-48.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía UNAM. México, D. F.
- Gardiazabal I., F., F. Mena V., C. Magdahl S., C. Adriazola C. y J. Torres B. 2011. Nuevos sistemas de poda en árboles adultos de paltos (*Persea americana* Mill), cv Hass. Proceedings VII World Avocado Congress 2011 (Actas VII Congreso Mundial del Aguacate 2011). 5 – 9 September 2011. Cairns, Australia.
- González M., A. C. 2007. La extracción y consumo de biomasa en México (1970-2003): integrando la leña en la contabilidad de flujos de materiales. *Rev. Iberoam. Econ. Ecol.* 6: 1-16.
- González-Durán, I. J. L. y S. Salazar-García. 2007. Uso de la poda progresiva para recuperar la productividad de huertos emboscados de aguacate 'Hass' en Nayarit. INIFAP, CIRPAC, Campo experimental Santiago Ixcuintla. Folleto científico Núm. 2. Santiago Ixcuintla, Nayarit. México.
- Gutiérrez-Contreras, M., Ma. B. N. Lara-Chávez, H. Guillén-Andrade y A. T. Chávez-Bárcenas. 2010. Agroecología de la franja aguacatera en Michoacán México. *Interciencia* 35: 647-653.
- Harley, A. 2010. Biochar for reclamation in: The role of biochar in the carbon dynamics in drastically disturbed soils. pp. 27-38. In: J. Levine (ed.). U.S.-Focused Biochar Report: Assessment of Biochar's Benefits for the United States of America. USA.
- Laird, D. A., R. C. Brown, J. E. Amonette, and J. Lehmann. 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofpr* 3: 547-562. doi: 10.1002/bbb.169.
- Lehmann, J. 2007. A handful of carbon. *Nature* 447: 143-144. doi:10.1038/447143a.

- Lehmann, J., J. Gaunt, and M. Rondon. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitg. Adapt. Strat. Glob. Change.* 11: 403-427. doi: 10.1007/s11027-005-9006-5.
- Manyà, J. J. 2012. Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ. Sci. Technol.* 46: 7939-7954. doi: 10.1021/es301029g.
- Mekuria, W and A. Noble. 2013. Review article: the role of biochar in ameliorating disturbed soils and sequestering soil carbon in tropical agricultural production systems. *Appl. Environ. Soil Sci.* Volume 2013, Article ID 354965. doi: 10.1155/2013/354965.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-012-SCT-2-2014, 2014. Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. DOF. Primera sección. pp. 19-45. México, D. F.
- Pernalete, Z., F. Piña, M. Suárez, A. Ferrer y C. Aiello. 2008. Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacial: efecto de la humedad del bagazo y la carga de amoniaco. *Bioagro* 20: 3-10.
- Roberts, K. G., B. A. Gloy, S. Joseph, N. R. Scott, and J. Lehmann. 2010. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environ. Sci. Technol.* 44: 827-833. doi: 10.1021/es902266r.
- Sáenz P., L., Y. Avendaño y K. Blanco. 2007. Evaluación microestructural del acero inoxidable austenítico AISI 304 sometido a ensayos de Creep. *Rev. Ing. UC* 14: 42-49.
- Salazar-García, S., L. Zamora-Cuevas y R. J. Vega-López. 2005. Actualización sobre la industria del aguacate en Michoacán, México. *California Avocado Society 2004-05 Yearbook* 87: 45-54.
- Salcedo P., M. P., V. Sarmiento G. y C. F. Rueda. 2014. Análisis del mercado internacional de hierro y acero: Evolución reciente y dinámicas regionales. *Estud. Econ.* 59: 1-20.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. Información geoespacial. <http://www.siap.gob.mx/informacion-geoespacial/>. (Consulta: octubre 15, 2016).
- Scholz, S. M., T. Sembres, K. Roberts, T. Whitman, K. Wilson, and J. Lehmann. 2014. Biochar systems for smallholders in developing countries. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. Washington, DC 20433, USA. ISBN (electronic): 978-0-8213-9526-4. doi: 10.1596/978-0-8213-9525-7.
- Sohi, S., E. Lopez-Capel, E. Krull, and R. Bol. 2009. Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. *CSIRO Land and Water Science Report 05/09.*
- Thorp, T. G. and B. Stowell. 2001. Pruning height and selective limb removal affect yield of large 'Hass' avocado trees. *HortScience* 36: 699-702.
- Valencia, M. S. y H. J. Vargas. 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera Bosques* 3: 81-87. doi: 10.21829/myb.1997.311381.
- Vega-Oregel, J. y L. E. Medina-Orozco. 2015. Efecto de plaguicidas sobre la respiración de suelos cultivados con aguacate del Estado de Michoacán, México. pp. 251-255. In: F. Paz, J. Wong y R. Torres (eds.). 2015. Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-3-6.
- Velázquez, A., E. Durán, A. Larrazábal, F. López y C. Medina. 2007. La cobertura vegetal y los cambios de uso del suelo. pp. 28-32. In: M. Mendoza, A. Velázquez, A. Larrazábal y A. Toledo (comps.). *Atlas fisicogeográfico de la cuenca del Tepalcatepec. SEMARNAT, INE, CIGA, UNAM, El Colegio de Michoacán.* México, D. F. ISBN: 978-607-02-3838-3.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecol.* 62: 21-37.
- Velázquez-Duran, J. Alejandro, E. Madrigal-Saavedra, H. Ochoa-Ochoa y L. Medina-Orozco. 2015. Biocarbono como mejorador de vertisoles degradados del Bajío Michoacano. pp. 29-34. In: F. Paz, J. Wong y R. Torres (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C y el Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-3-6.
- Venkatesh, K. S. and A. S. Roy. 2010. Development and installation of high pressure boilers for co-generation plant in sugar Industries. *Smart Grid Renew. Ener.* 1: 51-53. doi:10.4236/sgre.2010.11008.