

Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas

Carlos Alberto Pérez-Cabrera¹
Porfirio Juárez-Lopez^{1§}
José Anzaldo-Hernández²
Irán Alia-Tejacal¹
Eduardo Salcedo-Pérez³
Rosendo Balois-Morales⁴

¹Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural-Facultad de Ciencias Agropecuarias-Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Avenida Universidad 1001. Cuernavaca, Morelos, México. CP. 62210. ²Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías-Universidad de Guadalajara. Blvd. Marcelino García Barragán 1421, Esquina Calzada Olímpica, Guadalajara, Jalisco, México. CP. 44430. ³Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias-Universidad de Guadalajara. Camino Ramón Padilla Sánchez núm. 2100, Nextipac, Zapopan, Jalisco, México. CP. 45200. ⁴Unidad de Tecnología de Alimentos-Secretaría de Investigación y Posgrado-Universidad Autónoma de Nayarit. Ciudad de la Cultura s/n, Tepic, Nayarit, México. CP. 63000.

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

Resumen

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

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

Recibido: enero de 2021
Aceptado: marzo de 2021

El biocarbón es un material sólido rico en carbono que se obtiene por la conversión termoquímica de materiales orgánicos en un ambiente limitado o carente de oxígeno (Zheng *et al.*, 2016; Guo, 2020), el cual tiene propiedades físicas y químicas aptas para el almacenamiento de carbono a largo plazo en un medio natural y potencialmente mejora de la fertilidad del suelo (Ibarrola *et al.*, 2013).

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

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

En los últimos años se han incrementado las investigaciones acerca de la producción y aprovechamiento del biocarbón (Jirka y Tomlinson, 2014; Verheijen *et al.*, 2014) por lo que esta revisión concentra la información de los beneficios potenciales del biocarbón en la agricultura. Se plantearon dos objetivos: 1) proporcionar una reseña de las técnicas de producción de biocarbón; y 2) realizar una revisión acerca del efecto del biocarbón en el crecimiento y productividad de cultivos. Se incluyen las investigaciones de biocarbón en la agricultura realizadas en México, costos de producción, así como las tendencias y perspectivas de investigación.

Criterios empleados en la búsqueda de información

La búsqueda de artículos en inglés se efectuó en la base de datos de Web of Science, Dialnet, Redalyc y Scielo para los artículos en español, publicados de enero de 2011 a diciembre de 2020. Se consideraron las siguientes palabras en inglés biochar, importance of biochar, biochar and soil, biochar and yield of crops, biochar in agriculture, biochar in horticulture y en español: biocarbón, importancia del biocarbón, biocarbón y suelo, biocarbón y rendimiento de cultivos, biocarbón en agricultura, biocarbón en la horticultura.

De esta búsqueda, tanto en inglés como en español se obtuvieron 34 577 artículos, después se descartaron los artículos que se enfocaban en temas de termodinámica, compuestos químicos estructurales del biocarbón y microbiología de suelos, lo que redujo el número de artículos a 5 461. Finalmente, se seleccionaron 46 artículos enfocados en la aplicación del biocarbón con fines de incrementar la productividad de cultivos agrícolas.

Técnicas para producir biocarbón

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

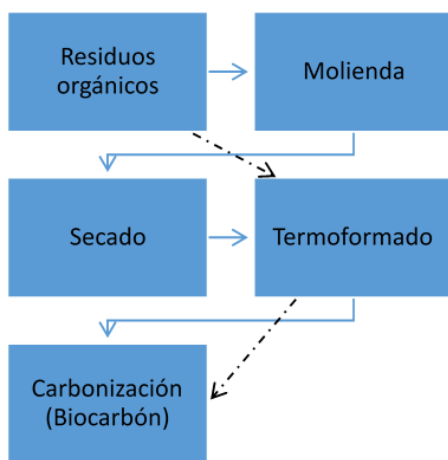


Figura 1. Diagrama del proceso de carbonización en seco (pirólisis). Las flechas con líneas discontinuas indican el proceso de la carbonización hidrotérmica (HTC). Adaptado de Quesada-Kimsey (2012).

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

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

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

HTC: por sus siglas en inglés, carbonización hidrotérmica.

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

Biocarbón en el crecimiento y productividad de cultivos

La interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas determinan la fertilidad del suelo, las cuales pueden ser modificadas positivamente con la adición de biocarbón y puede favorecer el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Silva *et al.* (2017) evaluaron tres biocarbones en dosis de 0, 2.5, 5, 7.5 y 10% v/v en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) y encontraron que, independientemente del biocarbón usado, estos promovieron mayor desarrollo de la planta de frijol con un aumento en la masa seca de raíz y tallo, el número de vainas, el número y la masa seca de los granos, en comparación con el tratamiento control. En general, las dosis de 10, 7 y 7% de biocarbón de cascarilla de arroz, aserrín y sorgo ensilado, respectivamente, generaron el mayor número de vainas, número de granos y en consecuencia, mayor producción de materia seca en grano de frijol.

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

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

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

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

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

Materia prima	Técnica	Temperatura (°C)	Dosis de aplicación de biocarbón	Cultivo	Beneficio agronómico (incremento respecto al tratamiento testigo sin aplicación de biocarbón)	Referencia
Aserrín de pino	Pirólisis	400	1% (22 t ha ⁻¹)	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	24% en altura de planta y 22% en rendimiento (materia seca por maceta)	Laghari <i>et al.</i> (2015)
Paja de trigo	Pirólisis	525	3% (90 t ha ⁻¹)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	8.3% en peso de materia seca	Kloss <i>et al.</i> (2014)
Poda de viñedo	Pirólisis	400	3% (90 t ha ⁻¹)	Trébol rojo (<i>Trifolium pratense</i> L.)	18% en peso de materia seca	
Poda de olivo	Pirólisis	449	1%	Girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	31% en peso de materia seca	Albuquerque <i>et al.</i> (2014)
Residuos de madera de abeto	HTC	180	4%	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	15.4 % en el rendimiento (peso de materia seca por maceta) en el segundo ciclo	Bargmann <i>et al.</i> (2014a)
Hojuelas de remolacha	HTC	190	4%	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	46.3% en peso de materia seca	Bargmann <i>et al.</i> (2014b)
Hojuelas de remolacha	HTC	190	4%	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	147% en peso de materia seca	
Hojuelas de remolacha	HTC	190	2%	Puerro (<i>Allium ampeloprasum</i>)	61.3% en peso de materia seca	
Cascarilla de arroz	Gasificación	900-1100	50 g kg ⁻¹	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	903% en peso de materia fresca	Carter <i>et al.</i> (2013)
Residuos de codorniz	Pirólisis	500	98.4 g por maceta	Soya (<i>Glycine max</i> L.)	229.4% en peso de materia seca	Suppadit <i>et al.</i> (2012)

Materia prima	Técnica	Temperatura (°C)	Dosis de aplicación de biocarbón	Cultivo	Beneficio agronómico (incremento respecto al tratamiento testigo sin aplicación de biocarbón)	Referencia
Estiércol de vaca	Pirólisis	500	15 t ha ⁻¹	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	150% en el rendimiento de grano y 64.6% en altura de planta	Uzoma <i>et al.</i> (2011)

HTC: por sus siglas en inglés, carbonización hidrotérmica.

Como se puede observar en el Cuadro 2, la mayoría de las investigaciones se han realizado en cultivos de cereales y algunas hortalizas, sin embargo, hace falta investigar el efecto del biocarbón en el crecimiento de plantas ornamentales, aromáticas y medicinales, sobre todo por la importancia económica y social de esos cultivos hortícolas. Recientemente el biocarbón además de utilizarse como mejorador de suelo, también se utiliza en la producción de cultivos en contenedor y en invernadero.

En este sentido, el biocarbón se emplea en mezcla con sustratos comerciales como turba (*peat moss*), perlita, fibra de coco, vermiculita, entre otros, para mejorar sus propiedades físicas y químicas (Blok *et al.*, 2017; Huang y Gu, 2019). Por ejemplo, Guo *et al.* (2018) proponen que el biocarbón puede ser utilizado hasta en 80% mezclado con el sustrato Shunshine[®] Mix # 1 en la producción de nochebuena en invernadero, sin afectar la calidad visual de la planta ni el índice de crecimiento.

Estos mismos autores concluyeron que las plantas de nochebuena cultivadas con 20% de biocarbón mostraron mayor crecimiento (8.3%) que el tratamiento testigo sin biocarbón. Por otra parte, Blok *et al.* (2017) reportaron que el biocarbón a base de madera, y residuos de tomate y pimiento dulce, puede sustituir en 20 y 10% con base a volumen a la turba comercial sin afectar el crecimiento de crisantemo y gerbera cultivados en maceta, respectivamente. Estos resultados plantean la posibilidad de que el biocarbón puede ser empleado en mezclas de sustratos orgánicos con la finalidad de remplazar parcialmente el uso de turba comercial (*peat moss*) no renovable, lo que permitiría reducir costos de producción y un manejo agronómico más sustentable.

Investigaciones de biocarbón en México

En función de los artículos publicados en revistas indizadas en los últimos 10 años, en México las investigaciones de biocarbón con fines agrícolas son escasas. A continuación se describen brevemente las investigaciones que se han realizado: Orozco-Gutiérrez y Lira-Fuentes (2020) evaluaron cinco temperaturas (350, 450, 550, 650 y 750 °C) en la elaboración de biocarbón de bambú producido mediante pirólisis lenta y obtuvieron que la mejor temperatura para la producción de biocarbón de bambú fue a 550 °C con rendimiento de conversión de 27%, además, con ese

tratamiento se presentaron los mayores valores en las propiedades físicoquímicas con 11.2% de volátiles, 8.1% de cenizas y 72% de carbón. Velázquez-Maldonado *et al.* (2019) reportaron que para la elaboración de biocarbón de cascarilla de arroz, la adición de los ácidos maleico y cítrico al 10% como catalizadores, generan el mayor rendimiento de conversión (66%).

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

Por su parte, Medina y Medina (2018) construyeron y evaluaron el desempeño en condiciones de campo, de un prototipo de biocarbón-pirólisis autotérmico y móvil, con volumen útil de 1.7 m³ de biomasa triturada. En el equipo mencionado anteriormente, el cual tenía capacidad para procesar entre 300 y 400 kg de biomasa por día, elaboraron biocarbón de residuos de poda de aguacate, con un rendimiento de 16% en biocarbón.

Por su parte, Concilco-Alberto *et al.* (2018) al evaluar un biocarbón comercial de bambú en el crecimiento y rendimiento de avena forrajera, reportaron que el mejor tratamiento fue 25 t ha⁻¹ de biocarbón con fertilización convencional NPK (120-60-00), ya que incrementa 34% la altura de planta y en 103% la materia fresca en comparación al tratamiento testigo. Escalante-Rebolledo *et al.* (2016) realizó una revisión acerca de la naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo del biocarbón. Como se puede apreciar, en México existe un interés creciente en el uso de biocarbón, pero hacen falta más investigaciones para fortalecer el aprovechamiento del biocarbón en sistemas de producción agrícola.

Costos de producción del biocarbón

La información detallada de los costos de producción de biocarbón es limitada; sin embargo, existen algunas investigaciones donde han realizado estimaciones tecnológicas y económicas. En México, Medina y Medina (2018) construyeron un equipo móvil de pirólisis lenta fabricado en acero inoxidable para la elaboración de biocarbón de residuos de aguacate, con un costo estimado de USD \$32 500.00 con capacidad de 1.7 m³ de volumen útil, equivalente entre 300 a 400 kg de madera, la cual está en función del tamaño y humedad de la astilla.

La vida útil del equipo se considera de siete años, con uso intensivo de 19 h diarias durante los 365 días del año y 23 años con uso moderado de 8 h diarias durante el mismo lapso. Sin embargo, la recuperación de la inversión estará en función del análisis económico.

Estos autores mencionan que el equipo fabricado presenta costos competitivos respecto a equipos producidos en otros países, por ejemplo, equipos de fabricación norteamericana con capacidad de transformación de 200 kg de biomasa por carga, cuestan USD \$350 000.00 más un costo adicional de USD \$25 000.00 por concepto de capacitación.

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

Jirka y Tomlinson (2014) mencionan que el biocarbón y mezclas de biocarbón se comercializa en varios países de América del Norte, Europa, Asia, Oceanía y África con un precio promedio de USD \$2.65 kg⁻¹. La mayoría de las empresas dedicadas a la producción de biocarbón realizan sus ventas desde su sitio web y viveros, lo que significa que se vende a nichos de mercado de alta gama para su uso final en jardinería, viveros, paisajismo y otros productos a pequeña escala.

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

Tendencias y perspectivas de investigación

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

Desde el punto de vista de proceso

Determinar las condiciones óptimas para la elaboración de biocarbón mediante la evaluación de las técnicas termoquímicas, temperatura, tiempo de calentamiento, presión del reactor y adición de catalizadores. Estos factores influyen en las propiedades físicas y químicas de biocarbón.

Caracterizar las propiedades físicas y químicas de biocarbones elaborados con biomasa vegetal de disponibilidad local, para favorecer un manejo sustentable. Enriquecimiento de biocarbones con minerales específicos y su posterior incorporación en suelos agrícolas. Evaluación de biocarbón como alternativa para remediar suelos contaminados con metales pesados y por herbicidas.

Desde el punto de vista de uso agrícola

Evaluar dosis de biocarbón en diferentes tipos de suelo a mediano y largo plazo, su efecto en las propiedades físicas y químicas de suelos, así como en el crecimiento y rendimiento de cultivos. Evaluar el efecto de la aplicación del biocarbón al suelo en combinación con fertilizantes químicos, puesto que se ha observado su efecto positivo en el crecimiento de las plantas; sin embargo, hacen falta estudios para esclarecer los mecanismos del sinergismo.

Evaluar el efecto del biocarbón en el crecimiento y rendimiento en plantas ornamentales, así como en hierbas aromáticas y plantas medicinales, debido a que la mayoría de los estudios del efecto de biocarbón se han realizado en cereales y algunas hortalizas. Investigar el efecto del biocarbón sobre la actividad microbiana y su interacción con las plantas, así como el efecto sinérgico con el uso de micorrizas. Investigar acerca de la incorporación de biocarbón en el suelo para atenuar el efecto adverso de la presencia de elementos o sustancias contaminantes.

Investigar mezclas de biocarbón con sustratos orgánicos no renovables, como la turba comercial con la finalidad de disminuir su uso en la agricultura protegida. El biocarbón puede ser una alternativa para sustituir o disminuir el uso de sustratos orgánicos no renovables, tanto en la producción de plántulas como en la producción de cultivos hortícolas de alto valor.

Conclusiones

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

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

Literatura citada

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

- Bargmann, I.; Rillig, M. C.; Kruse, A.; Greef, J. M. and Kücke, M. 2014a. Initial and subsequent effects of hydrochar amendment on germination and nitrogen uptake of spring barley. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177(1):68-74. doi:10.1002/jpln.201300160.
- Bargmann, I.; Rillig, M. C.; Kruse, A.; Greef, J. M. and Kücke, M. 2014b. Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177(1):48-58. doi:10.1002/jpln.201300069.
- Blok, C.; van der Salm, C.; Hofland-Zijlstra, J.; Streminska, M.; Eveleens, B.; Regelink, I.; Fryda, L. and Visser, R. 2017. Biochar for horticultural rooting media improvement: evaluation of biochar from gasification and slow pyrolysis. *Agronomy.* 7(6):1-23. doi:10.3390/agronomy7010006.
- Carter, S.; Shackley, S.; Sohi, S.; Boun-Suy, T. and Haefele, S. 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy.* 3(2):404-418. Doi:10.3390/agronomy 3020404.
- Concilco-Alberto, E.; Moreno-Reséndez, A.; García-Carrillo, M.; Quiroga-Garza, H. M. y Ángel-García, O. 2018. Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera. *Terra Latinoam.* 36(3):221-228. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.375>.
- Ekpo, U.; Ross, A. B.; Camargo-Valero, M. A. and Fletcher, L. A. 2016. Influence of pH on hydrothermal treatment of swine manure: impact on extraction of nitrogen and phosphorus in process water. *Bio. Technol.* 214(1):637-644. doi:10.1016/j.biortech.2016.05.012.
- Escalante-Rebolledo, A.; Pérez-López, G.; Hidalgo-Moreno, C.; López-Collado, J.; Campos-Alves, J.; Valtierra-Pacheco, E. y Etchevers-Barra, J. D. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoam.* 34(3):367-382. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57346617009>.
- Filiberto, M. and Gaunt, L. J. 2013. Practicality of biochar additions to enhance soil and crop productivity. *Agriculture.* 3(4):715-725. doi:10.3390/agriculture3040715.
- Guo, M. 2020. The 3R principles for applying biochar to improve soil health. *Soil Systems.* 4(9):1-16. doi:10.3390/soilsystems4010009.
- Guo, Y.; Niu, G.; Starman, T.; Volder, A. and Gu, M. 2018. Poinsettia growth and development response to container root substrate with biochar. *Horticulturae.* 4(1):2-14. doi:10.3390/horticulturae4010001.
- Huang, L. and Gu, M. 2019. Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants-A review. *Horticulturae.* 5(14):2-25. doi:10.3390/horticulturae5010014.
- Ibarrola, R.; Evar, B. y Reay, D. 2013. Comercialización de Biocarbón (biochar) en México. Definición del contexto para un programa de investigación multidisciplinario. (Ed.). Universidad Edimburgo, Escocia. 28 p. <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Comercializacion-de-Biochar-en-Mexico.pdf>.
- Iftikhar, S.; Shahzad-Ahmad, K. and Mahar-Gul, M. 2018. Low-cost and environmental-friendly *Triticum aestivum*-derived biochar for improving plant growth and soil fertility. *Comm. Soil Sci. Plant Analysis.* 49(22):2814-2827. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1546869>.
- Jirka, S. and Tomlinson, T. 2014. State of the biochar industry a survey of commercial activity in the biochar field. *International Biochar Initiative (IBI).* 61 p.
- Kambo, H. S. and Dutta, A. 2015. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 45(2):359-378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>.

- Kloss, S.; Zehetner, F.; Wimmer, B.; Buecker, J.; Rempt, F. and Soja, G. 2014. Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177(1):3-15. doi: 10.1002/jpln.201200282.
- Kruse, A.; Funke, A. and Titirici, M. M. 2013. Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion Chem. Biol.* 17(3):515-521. doi:10.1016/j.cbpa.2013.05.004.
- Laghari, M.; Hu, Z.; Mirjat, M.; Xiao, B.; Tagar, A. and Hu, M. 2016. Fast pyrolysis biochar from sawdust improves quality of desert soils and enhances plant growth. *J. Sci. Food Agric.* 96(1):199-206. doi:10.1002/jsfa.7082.
- Laghari, M.; Mirjat, M.; Hu, Z.; Fazal, S.; Xiao, B.; Hu, M.; Chen, Z. and Guo, D. 2015. Effects of biochar application rate in Sandy desert soil properties and sorghum growth. *Catena.* 135(1):313-320. doi:10.1016/j.catena.2015.08013.
- Liu, D.; Feng, Z.; Zhu, H.; Yu, L.; Yang, K.; Yu, S.; Zhang, Y. and Guo, W. 2020. Effects of corn straw biochar application on soybean growth and alkaline soil properties. *BioResources.* 15(1):1463-1481.
- Manolikaki, I. and Diamadopoulos, E. 2019. Positive effects of biochar and biochar-compost on maize growth and nutrient availability in two agricultural soils. *Comm. Soil Sci. Plant Analysis.* 50(5):512-526. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566468>.
- Medina O., L. E. y Medina O. I. N. 2018. Prototipo autotérmico móvil para la producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. *Terra Latinoam.* 36(2):121-129. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.217>.
- Melo, C. A.; Junior, F. H. S.; Bisinoti, M. C.; Moreira, A. B. and Ferreira, O. P. 2016. Transforming sugarcane bagasse and vinasse wastes into hydrochar in the presence of phosphoric acid: an evaluation of nutrient contents and structural properties. *Waste and Biomass Valorization.* 8(4):1139-1151. doi:10.1007/s12649-016-9664-4.
- Mukherjee, A. and Lal, R. 2014. The biochar dilemma. *Soil Res.* 52(3):217-230. <http://dx.doi.org/10.1071/SR13359>.
- Orozco-Gutierrez, G. y de Lira-Fuentes, R. 2020. Elaboración de biocarbón para el aprovechamiento de residuos provenientes de las podas de bambú (*Guadua angustifolia*). *Rev. Mex. Agroecosistemas.* 7(1):1-9.
- Pérez-Salas, R. A.; Tapia-Fernández, A. C.; Soto, G. y Benjamin, T. 2013. Efecto del bio-carbón sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* y el desarrollo de plantas de banano (*Musa* AAA). *InterSedes: Revista Electrónica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica.* 14(27):66-100. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66627452004>.
- Petter, F. A.; Leite, L. F. C.; Machado, D. M.; Marimon Júnior, B. H.; Lima, L. B.; Freddi, O. S. and Araújo, A. S. F. 2019. Microbial biomass and organic matter in an oxisol under application of biochar. *Bragantia.* 78(1):109-118. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.2018237>.
- Quesada-Kimsey, J. 2012. La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. *Tecnología en Marcha.* 25(5):14-21. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.465>.
- Scheifele, M.; Hobi, A.; Buegger, F.; Gattinger, A.; Schulin, R.; Boller, T. and Mäder, P. 2017. Impact of pyrochar and hydrochar on soybean (*Glycine max* L.) root nodulation and biological nitrogen fixation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 180(2):199-211. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600419>.
- Silva, I. C. B.; Fernandes, L. A.; Colen, F. and Sampaio, R. A. 2017. Growth and production of common bean fertilized with biochar. *Ciência Rural.* 47(11):1-8.

- Silva, M. I.; Mackowiak, C.; Minogue, P.; Ferreira-Reis, A. Da Veiga-Moline, E. F. 2017. Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings. *Ciência Rural*. 47(1):1-5. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33148021001>.
- Steiner, C. 2016. Considerations in biochar characterization. *Agricultural and environmental applications of biochar: advances and barriers*, SSSA Special Publication. 63(1):87-99. doi:10.2136/sssaspecpub63.2014.0038.5.
- Suppadit, T.; Phumkokrak, N. and Pongsuk, P. 2012. The effect of using quail litter biochar on soybean (*Glycine max* L.) production. *Chilean J. Agric. Res.* 72(2):244-251. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000200013>.
- Uzoma, K. C.; Inoue, M.; Andry, H.; Fujimaki, H.; Zahoor, A. and Nishihara, E. 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*. 27(2):205-212. doi:10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x.
- Velázquez-Machuca, M. A.; Equihua-Soriano, J. R.; Venegas-González, J.; Montañez-Soto, J. L.; Pimentel-Equihua, J. L. y Muñoz-Navia, M. 2019. Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. *Terra Latinoam.* 37(3):243-251. doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.409>.
- Velázquez-Maldonado, J.; Juárez-López, P.; Anzaldo-Hernández, J.; Alejo-Santiago, G.; Valdez-Aguilar, L. A.; Alia-Tejacal, I.; López-Martínez, V.; Pérez-Arias, A. y Guillén-Sánchez, D. 2019. Concentración nutrimental de biocarbón de cascarilla de arroz. *Rev. Fitotec. Mex.* 42(2):129-136. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/42-2/5a.pdf>.
- Verheijen, F. G. A.; Graber, E. R.; Ameloot, N.; Bastos, A. C.; Sohi, S. and Knicker, H. 2014. Biochars in soils: new insights and emerging research needs. *Eur. J. Soil Sci.* 65(1):22-27. doi:10.1111/ejss.12127.
- Videgain-Marco, M.; Marco-Montori, P.; Martí-Dalmau, C.; Jaizme-Vega, M. C.; Manyà-Cervelló, J. J. and García-Ramos, F. J. 2020. Effects of biochar application in a sorghum crop under greenhouse conditions: growth parameters and physicochemical fertility. *Agronomy*. 10(1):1-17. doi:10.3390/agronomy10010104.
- Xu, C. Y.; Hosseini Bai, S.; Hao, Y.; Rachaputi, R. C. N.; Xu, Z. and Wallace, H. M. 2015. Peanut shell biochar improves soil properties and peanut kernel quality on a red Ferrosol. *J. Soils and Sediments*. 15(11):2220-2231. doi:10.1007/s11368-015-1242-z.
- Zheng, W.; Holm, N. and Spokas, K. A. 2016. Research and application of biochar in North America. *In: Guo, Z; He, M. S.; Uchimiya, M. (Ed.). Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, SSSA Special Publication. 63(1):475-494. doi:10.2136/sssaspecpub63.2014.0053.