



Revisión de literatura

Investigación y uso del biocarbón en Costa Rica

Gabriela Soto-Muñoz^{1/*}, Juan Salvador Chin-Pampillo², Karolina Villagra-Mendoza³, Cristina Chinchilla-Soto⁴

*Autora para correspondencia. Correo electrónico: maria.sotomunoz@ucr.ac.cr

¹Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, San José, Costa Rica.

²Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, San José, Costa Rica.

³Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola, Cartago, Costa Rica.

⁴Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, San José, Costa Rica.

DOI: <https://doi.org/10.15517/sh3x5e25>

Recibido el 06 de enero del 2025; Aceptado el 24 de junio del 2025

Resumen

Introducción. En los últimos 15 años, universidades, empresas privadas, ONG y cámaras de productores han realizado investigaciones en biocarbón en Costa Rica. **Objetivo.** Recopilar resultados observados en documentos técnicos (boletines y reportes) y científicos (artículos científicos y tesis) relacionados con el uso del biocarbón en Costa Rica. **Desarrollo.** Se presentan diferentes diseños de hornos, predominando el horno de estañón a pequeña escala y temperaturas entre 400 y 600 °C. Las materias primas utilizadas para producir biocarbón son residuos de madera (*Gmelina arborea*, *Cordia alliodora*), leña de sistemas agroforestales de café y banano, bambú, rastrojo de caña de azúcar y pinzote de palma aceitera. El biocarbón se ha caracterizado mediante metodologías como análisis elemental, análisis proximal y contenido de nutrientes. **Conclusiones.** Se han observado resultados positivos en el desarrollo de los cultivos, específicamente en suelos ácidos (dosis entre 10 y 20 t ha⁻¹) cultivados con palma aceitera y hortalizas. No se observaron incrementos significativos en el desarrollo de los cultivos con la aplicación de biocarbón en suelos altos en bases (Inceptisoles) o en suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) en cacao, palma aceitera y hortalizas. Se observaron mejoras significativas en la retención de agua con dosis de 30 t ha⁻¹ en suelos arenosos, y una disminución significativa en la incidencia de *Radophulus similis* y *Fusarium oxysporum* en banano, con la adición de biocarbón y microorganismos endófitos. Se recomienda la

elaboración de biocarbón a partir de subproductos agrícolas y su utilización en cultivos y zonas cercanas al sitio de elaboración para favorecer la bioeconomía circular. Líneas futuras de investigación deberían incluir: mejora en el diseño de los hornos para materiales como la fibra de palma aceitera; evaluación del impacto del biocarbón en la retención de agua, nutrientes y plaguicidas, y en la productividad de cultivos en suelos ácidos y arenosos.

Palabras clave: hornos de biocarbón; rastrojo de palma aceitera; producción agrícola; sostenibilidad; mejorador de suelos; gestión de residuos agrícolas.

Literature review

Abstract

Research and use of biochar in Costa Rica

Introduction. Universities, private companies, non-governmental organizations, and producers' organizations have conducted research on biochar in Costa Rica in the last 15 years. **Objective.** To compile observed results in technical documents (bulletins, reports) and scientific documents (scientific papers and theses) related to the use of biochar in Costa Rica. **Content.** Different furnace designs are presented, with a predominant of the small-scale tin furnace and temperatures between 400 and 600 °C. The raw materials used to produce biochar are wood residues (*Gmelina arborea*, *Cordia alliodora*), firewood from coffee and banana agroforestry systems, bamboo, sugarcane stubble, and oil palm stalk. Methodologies have been developed to characterize biochar such as elemental analysis, proximate analysis, and nutrient content. **Conclusions.** Positive results have been observed in crop development, in acidic soils (doses between 10 and 20 t ha⁻¹) cropped with oil palm and vegetables. No significant increases in crop development were seen with the application of biochar in soils with high cation content (Inceptisols) and volcanic ash derived soils (Andisols) in cocoa, oil palm, and vegetables. Significant improvements in water retention were seen at doses of 30 t ha⁻¹ in sandy soils and a significant decrease in the incidence of *Radophylus similis* and *Fusarium oxysporum* in banana was observed, with the addition of biochar + endophytic microorganisms. Biochar production from agricultural byproducts and its use in crops and areas near the production site is recommended to promote the bioeconomy. Future lines of research should include: the improvement of ovens design to work with resistant materials such as oil palm fiber, evaluation of the biochar impact on water, nutrients, and pesticides retention, as well as crop productivity in acid and sandy soils.

Keywords: biochar kilns; oil palm stubble; agricultural production; sustainability; soil amendment; agricultural waste management.

Introducción

El biocarbón es un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de la biomasa en un ambiente con limitaciones de oxígeno (IBI 2015, Tomlinson *et al.* 2012). Este material se puede aplicar directamente al suelo como mejorador de suelos o como ingrediente de procesos de compostaje, para mitigación de gases de efecto invernadero o para adaptarse a las nuevas condiciones del cambio climático, ya que mejora la retención de humedad y reduce la lixiviación de nutrientes (Behera y Samal 2022, Liu *et al.* 2017, Oduor *et al.* 2016, Scott *et al.* 2014, Zhang *et al.* 2013).

La investigación sobre biocarbón en los últimos 25 años ha generado cerca de 47 000 artículos científicos con un 49% de artículos provenientes de China, según la búsqueda realizada en la base de datos Scopus el 10 de Julio del 2025 utilizando la palabra “biochar” (en la consulta Título-Abstract-Keywords). La investigación en biocarbón tuvo un aumento importante a partir del 2010 con un ascenso constante hasta el 2024 donde se publicaron cerca de 8500 artículos. Más de 30 000 artículos han sido publicados en los últimos 5 años (2020-2025), con un 29% asociados al área de Energía, un 20% al campo de la Agricultura y un porcentaje similar a las ciencias ambientales. De estas publicaciones, menos del 1% corresponden al trópico.

Pese a la gran cantidad de artículos publicados en el tema, al reducir la búsqueda a investigadores con afiliación en Costa Rica (inclusión de la palabra “Costa Rica” en la consulta Affiliation) se recuperaron solo 25 publicaciones, 60% de las cuales han sido generadas por investigadores del el Instituto Tecnológico de Costa Rica, y un 30% por de la Universidad de Costa Rica. Por lo que, en esta revisión, se incluyen no solo parte de las publicaciones encontradas en Scopus, sino también otros documentos técnicos y científicos generados en Costa Rica por diversas instituciones (**Tabla 1**), a partir del 2008, con el objetivo de sistematizar en un solo documento, los avances obtenidos al utilizar el biocarbón e identificar líneas de investigación futura.

Reseña histórica sobre la investigación en biocarbón en Costa Rica

El estudio del biocarbón en el país inicia formalmente en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), con un énfasis en el diseño de hornos de bajo costo (Soto *et al.* 2012, Pérez-Martínez 2015, Segura-Chavarría 2018, Lerner *et al.* 2019). El CATIE inició con una investigación sobre el potencial de la producción de biocarbón en dos zonas con alta densidad de aserraderos y plantaciones forestales (Península de Nicoya y Península de Osa), con la finalidad de producir el biocarbón, principalmente, a partir de desechos de estas industrias (Benjamin *et al.* 2012, Soto *et al.* 2012).

Tabla 1. Resumen de instituciones, empresas privadas y organizaciones no gubernamentales trabajando en investigación, producción y uso de biocarbón en Costa Rica y sus zonas de trabajo.**Table 1.** Summary of institutions, private companies, and non-governmental organizations working in biochar research, production, and use in Costa Rica and their work areas.

Institución	Temas prioritarios	Zonas de trabajo	Referencias
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)	Diseño de hornos de bajo costo, evaluación en hortalizas, palma aceitera y cacao. Manejo de plagas, percepción de usuarios en zonas indígenas	La Palma y Puerto Escondido, de Puerto Jiménez, Hojanca de Nicoya, Zarcero, Turrialba y Talamanca	Benjamin <i>et al.</i> (2012) Henreaux <i>et al.</i> (2012) Lerner <i>et al.</i> (2019) Soto <i>et al.</i> (2012)
Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC)	Diseño de hornos de bajo costo, protocolos caracterización del biocarbón, impacto sobre características de suelo (química, hidráulica y mecánica), en tomate, maíz y cebolla. Producción y uso de Terra Preta	Tarrazú y Cartago	Pérez Martínez (2015) Quesada Kimzey (2012) Segura Chavarría (2018) Villagra-Mendoza <i>et al.</i> (2017) Villagra-Mendoza y Horn (2018a)
Universidad de Costa Rica (UCR)	Caracterización de biocarbón y su impacto en el manejo de <i>Fusarium</i> en banano	Turrialba	Pérez Salas <i>et al.</i> (2013)
Universidad Nacional (UNA)	Efecto del biocarbón sobre la retención de Cd en el suelo en cacao. Producción de compost y lombricompost con biocarbón. Manejo de plagas	Heredia, Talamanca y Pilangosta, Guanacaste	Alpízar-Alfaro (2016) Madriz (2019) Rubio (2014).
Organización No Gubernamental SeaChar	Producción de hornos de cocción a bajo costo, distribución en zonas que cocinan con leña en Los Santos y Talamanca	Los Santos y Talamanca	Acosta (2014) Donnelly <i>et al.</i> (2014) López-Aviles (2014)
Corporación Bananera Nacional (CORBANA)	Efecto del biocarbón sobre poblaciones de micorrizas y manejo de nematodos y <i>Fusarium</i> en banano	Guápiles y Turrialba	Salas y Araya (2009)
Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA)	Producción de biocarbón en horno importado con diversas materias primas. Evaluación de su uso en caña de azúcar	Grecia	DIECA (2020)
Empresarios privados: Consorcio providencia	Importación de hornos, producción de biocarbón con diversas materias primas	Garabito de Quepos	Carmona, enero (2022). Comunicación personal
Palma Tica S.A.	Producción y uso de biocarbón de pinzote de palma aceitera	Garabito de Quepos	García, agosto (2021). Comunicación personal

Por su parte, desde el 2008, la Escuela de Química del TEC, en colaboración con la Universidad Nacional (UNA), produjeron biocarbón a base de biomasa de broza de café, residuos agrícolas de caña de azúcar y de piña (Roa Gutiérrez y Quesada Kimzey 2011). A partir del año 2017, se formó en el TEC, un equipo interdisciplinario entre investigadores de Química, Ingeniería Agrícola y Agronegocios, con el fin de promover el aprovechamiento de los desechos agrícolas, en un contexto de economía circular, por medio de la reconversión de biomásas en enmiendas con alto contenido de carbono.

En el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), la investigación en biocarbón inició en el 2017 con la alianza con el Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF) de la Universidad Autónoma de Barcelona. Se trabajó en la evaluación de los efectos de la incorporación de biocarbón elaborado a partir de rastrojo de piña, pinzote de palma aceitera y cascarilla de café, sobre el comportamiento ambiental de los herbicidas Bromacil y Diurón, y sobre el ecosistema edáfico. Se han realizado ensayos de disipación de los plaguicidas en condiciones controladas, así como de adsorción en el suelo. Además, se han incluido pruebas eco toxicológicas con bioindicadores terrestres (Chin-Pampillo *et al.* 2020a, 2020b, 2021). Posteriormente mediante el proyecto BIOECODES (El Biocarbón como estrategia de Economía circular: valorización de residuos agroindustriales para la Descarbonización y la protección de los recursos), con financiamiento del MICITT, la UCR en colaboración con el TEC y el INTA desarrollaron investigación para profundizar en la producción del biocarbón de pinzote de palma aceitera (Marín Guzman, 2022, Díaz Pérez 2025). Por otro lado, SeaChar es una organización no gubernamental con sede en Seattle Estados Unidos, que con fondos de National Geographic evaluó la producción y uso de un horno casero denominado Estufa Finca en dos zonas con alta densidad de población indígena del país: la zona cafetalera de Los Santos y la zona de Talamanca. Este proyecto promovió el uso de estufas de biocarbón en la región (Donnelly *et al.* 2014).

También, la Liga de la Caña inició investigaciones en el tema de biocarbón en el año 2020, con la importación de un horno de China para producir biocarbón con diversas materias primas, pero sobre todo el rastrojo de la industria de la caña (DIECA 2020). Con el biocarbón producido, han montado, principalmente, ensayos en campo e invernadero con caña de azúcar. Adicionalmente, empresas privadas como Consorcio Providencia, en Garabito de Quepos, producen biocarbón a gran escala a partir de residuos de la agroindustria y se han convertido en asesores nacionales e internacionales.

Con el fin de disminuir costos de transporte de residuos, su propuesta ha sido elaborar biocarbón en el sitio de producción del residuo. Esta empresa cuenta con equipo para la producción, molienda y aprovechamiento adicional del biocarbón para energía. El biocarbón se mezcla con otras enmiendas como humus de lombriz y se crean recetas a la medida del cliente para el mejoramiento del suelo (Carmona, enero 2022. Comunicación personal).

Producción de biocarbón en Costa Rica

Materias primas

En general, la producción de biocarbón en Costa Rica se ha basado en aprovechar biomásas de residuos de la agroindustria (**Tabla 2**). El proyecto del CATIE se enfocó en residuos de madera de los aserraderos y madera para la construcción de tarimas de empaque para la exportación hechas de *Gmelina arborea* (Soto *et al.* 2012). El TEC ha realizado investigación en pulpa de café con CoopeTarrazú (Quesada Kimzey 2014), bambú y residuos de madera de construcción (Pérez-Martínez 2015, Segura-Chavarría 2018). El CICA ha evaluado la producción de biocarbón a partir de residuos de piña, cascarilla de café y pinzote de palma aceitera (Chin-Pampillo *et al.* 2020b). DIECA, por su parte, ha producido biocarbón a partir de residuos de caña de azúcar, paja y pulpa de café (DIECA 2020).

Diseño de hornos

El CATIE, en alianza con el Ing. Robert Lerner, trabajó en un horno con una cámara de combustión hecha de ladrillo. La cámara de pirólisis fue un doble estañón con dos chimeneas para la salida del vapor de agua y el reciclaje posterior de los gases de pirólisis. El horno tiene una capacidad de 64 kg de madera, alcanza temperaturas de 550 °C y su tiempo de enfriamiento es de 8 horas (**Figura 1 A y B**) (Benjamin *et al.* 2012, Lerner *et al.* 2019). Este horno, fue posteriormente, transformado de tal forma que ambas cámaras fueron construidas con estañones. En La Palma de Puerto Jiménez, se construyeron tres de estos hornos colocados en serie, con una capacidad de 220 litros cada uno. Producen de 45 a 60 kg por día y alcanzan temperaturas entre los 400 y 500 °C (Acosta 2014).

En el 2012, el TEC diseñó y construyó un horno de estañón portátil de bajo costo, con una capacidad de 0,208 m³, un tiempo de carbonización promedio de 5 horas, y temperaturas registradas por encima de los 600 °C (**Figura 1, F**). Pérez-Martínez (2015) evaluó el funcionamiento de este horno con residuos de tarimas y con madera de descarte en la construcción. Posteriormente, el TEC adaptó el diseño del horno KonTiki donde el proceso de carbonización es abierto (**Figura 1 E**).

Tabla 2. Materias primas para la producción de biocarbón en Costa Rica.

Table 2. Raw materials for biochar production in Costa Rica.

Materia prima para biocarbón	Institución que realiza investigación*	Referencias
Leña variada	DIECA y Seachar	DIECA (2020)
Melina (<i>Gmelina arborea</i>)	CATIE, TEC	Rubio (2014) Segura-Chavarría (2018)
Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	UNA	Madriz (2019)
Poró (<i>Erythrina</i> sp.)	TEC	Madriz (2019)
Residuos madera de construcción	CATIE y TEC	Pérez-Martínez (2015)
Bambú guadua (<i>Guadua angustifolia</i> var. Sur)	TEC	Segura-Chavarría (2018) Masís-Meléndez <i>et al.</i> (2020)
Pinzote de Palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>)	UCR	Marín-Guzmán (2022)
Rastrojo de piña (<i>Ananas comusus</i>)	UCR	Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020b)
Biomasa residual de la industria de la caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	TEC y DIECA	Acosta (2014) DIECA (2020)
Pulpa de café (<i>Coffea arabica</i>)	TEC	Quesada-Kimzey (2014)

*CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza); UCR (Universidad de Costa Rica), TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica), UNA (Universidad Nacional), DIECA (Dirección de investigación de la Caña de Azúcar).

Hornos importados

Coopetarrazú, en el 2012, importó un horno THL-3 de la marca Leemay, de Zhengzhou, Henan, China, con capacidad de carbonización de 3 m³ o 500 kg, un consumo máximo de 4 kW y un tiempo de carbonización de 30 a 48 horas (Quesada Kimzey 2012). También, la Liga de la Caña de Azúcar importó un horno de China, de la marca GreenPower, con una capacidad de 850 kg, tiempo de carbonización de 6 a 8 horas y temperaturas de pirolización entre 600 a 700 °C (**Figura 1 F**). DIECA utiliza como combustible para el calentamiento del horno leña de café. Este calentamiento toma, aproximadamente, 3.5 horas para llegar a temperaturas cercanas a 450 °C (DIECA 2020).

Hornos para cocción

El proyecto Estufa Finca de SeaChar diseñó un horno para cocinar, el cual fue construido a partir de una lata de pintura de 5 galones, envuelto en su parte exterior por una lata de zinc (**Figura 1 C**). Cuenta con la particularidad de que la temperatura que se alcanza depende en parte de la materia prima con la que se trabaja. En el caso del horno Estufa Finca con bambú, se han reportado temperaturas entre 484 a 495 °C, mientras que con tablas de construcción se alcanzaron temperaturas de hasta 854 °C (Segura-Chavarría 2018). Este horno fue utilizado en las comunidades indígenas de la comarca Nāgbe-Buglé que migran de Panamá a cosechar el café en la zona de Los Santos, y con las poblaciones indígenas Cabécar y Bribri, de la organización Asociación de Pequeños Productores de Talamanca (APPTA) en la zona de Talamanca. La materia prima utilizada fue básicamente leña de café, cacao y árboles de sombra, y las temperaturas alcanzadas variaron entre 200 y 600 °C (Acosta 2014).

La aceptación de los hornos, por parte de la población meta, fue positiva. Sin embargo, los usuarios encuestados sugirieron áreas de mejora tales como un mayor número de puntos de cocción, un mejor sistema para agregar biomasa al horno durante la cocción y mayor seguridad para los niños (López-Aviles 2014). Resultados similares se han observado en África, donde los mayores retos consisten en las mejoras en el diseño de los hornos cocina para que sean totalmente aceptados por la población (Gitau *et al.* 2019, Eltigani *et al.* 2022). El proyecto SeaChar, adicionalmente, promovió la organización de empresas para producir y vender el biocarbón localmente, como incentivo para el uso del horno, sin embargo, el uso de los hornos ha sido discontinuado.

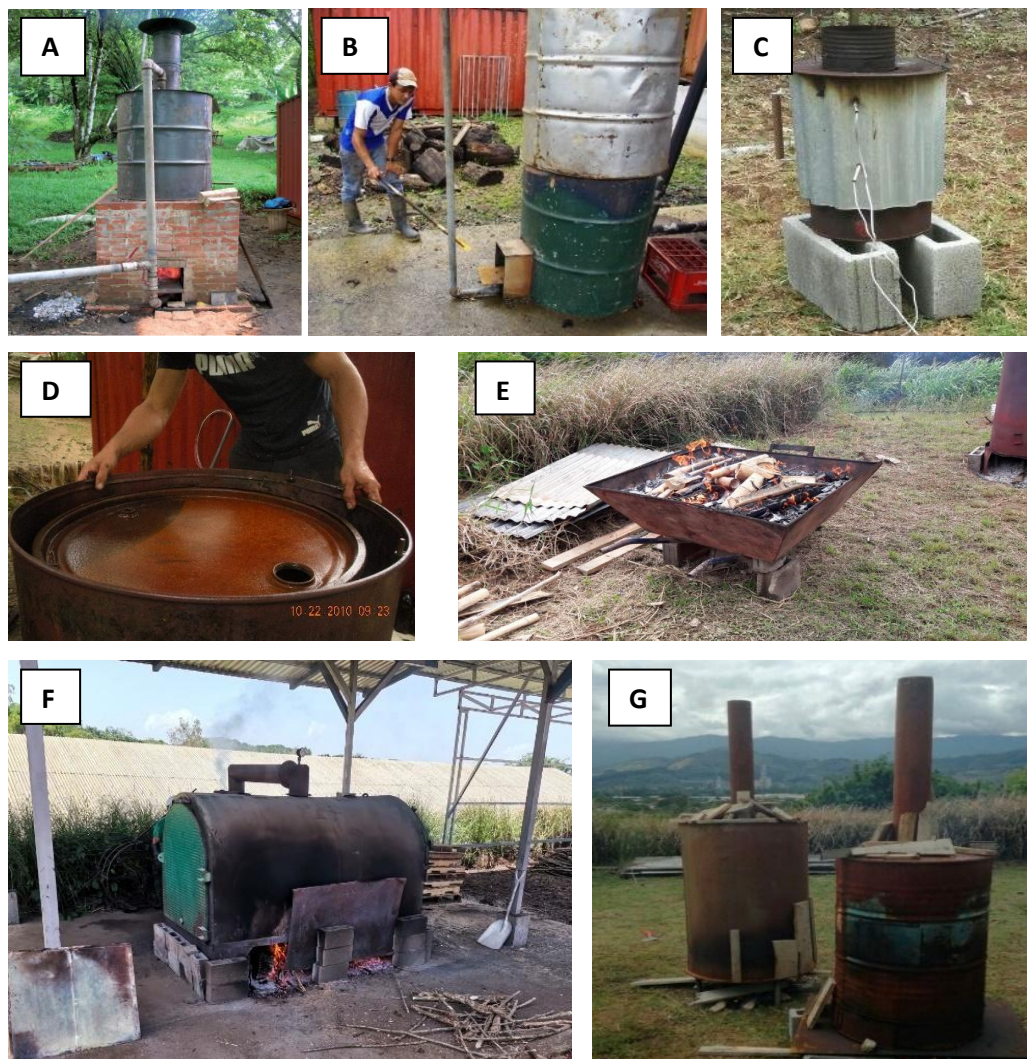


Figura 1. Hornos utilizados en Costa Rica para la producción de biocarbón. A y B) Horno empleado en el CATIE, Puerto Jiménez. C) Horno Estufa Finca diseñado por SeaChar, con dos termocuplas incluidas con objetivos de investigación a 15 y 18 cm. D) Se observa la doble cámara de los hornos, con doble chimenea. E) Horno Kontiki diseñado por el TEC. F) Horno Green Power importado por DIECA, Grecia. G) Horno de estañón de bajo costo diseñado en el TEC. Fotografías A, B, C, E y F son cortesía de Gabriela Soto. Fotografías D y G adaptadas de Segura-Chavarría (2018) y Pérez-Martínez (2015), respectivamente.

Figure 1. Biochar ovens used in Costa Rica. A and B) Oven used at CATIE, Puerto Jiménez. C) Oven-Stove Finca designed by SeaChar, with two thermocouples with a research objective at 15 and 18 cm. The double chamber of the ovens is shown, with a double chimney. E) Kontiki oven designed by TEC. F) Green Power oven imported by DIECA, Greece. G) Low-cost tin oven designed at TEC. Photos A, B, C, E and F courtesy of Gabriela Soto. Photos D and G were adapted from Segura-Chavarría (2018) and Pérez-Martínez (2015), respectively.

Horno con fines de investigación

En el Centro de Investigación para Contaminación Ambiental (CICA) de la Universidad de Costa Rica, se construyó un horno eléctrico de alimentación continua con un tornillo sin fin basado en el diseño del UK Biochar Research Center (UKBRC), siguiendo los lineamientos de Mašek *et al.* (2018). Este horno se utiliza con materiales que puedan ser fácilmente movilizables por el tornillo sin fin. Las temperaturas alcanzadas en este horno son de hasta 650 °C (Soto *et al.* 2023).

Caracterización del biocarbón

En la última década, se han desarrollado en el país las capacidades analíticas para caracterizar el biocarbón según las diferentes categorías establecidas por la Iniciativa Internacional de Biocarbón (IBI por sus siglas en inglés) (IBI 2015) y la Guía para la Producción Sostenible de Biocarbón, según la Fundación Europea para el Biocarbón (EBC 2022). Muchos de estos análisis ya han sido aplicados en los ensayos de investigación realizados en el país (**Tabla 3**).

En la Categoría C, se encuentran los análisis más avanzados para determinar el potencial como mejorador de suelos, como es la Superficie Específica (Chin-Pampillo *et al.* 2020a) y el contenido de nutrientes como fósforo, calcio, azufre, magnesio, entre otros (IBI 2015). Este es el análisis que más frecuentemente se ha realizado al biocarbón en Costa Rica. El laboratorio de suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la UCR utiliza una combustión seca para nitrógeno y una digestión húmeda por espectrofotometría de emisión atómica con plasma para P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al. Con este análisis, se caracterizó el biocarbón de *Gmelina arborea* producido en horno de estañones (Acosta 2014, Henreaux 2012, Hojah da Silva 2013, Pérez-Salas *et al.* 2013), el biocarbón de *Cordia alliodora* (Madriz 2019) y el biocarbón de fosa producido a partir de podas de guayaba (*Psidium cattleianum*) (Salas y Araya 2009) (**Tabla 4**).

Con fines de investigación, también se han realizado análisis de microscopía electrónica de barrido para determinar la porosidad de los materiales (**Figura 2**) (Chin-Pampillo *et al.* 2020a, Segura-Chavarría 2018), hidrofobicidad con el método de gota sésil (Segura-Chavarría 2018), y la capacidad de intercambio catiónico y aniónico (Segura-Chavarría 2018). Quesada Kimzey (2014) evaluó en condiciones controladas (mufla de laboratorio) la variabilidad en el porcentaje de carbono, con residuos de raquis de palma aceitera y madera de pino, y observó un coeficiente de variación del 2,5 y 2,1%, respectivamente ($n = 18$ y 17).

Tabla 3. Análisis que se realizan en Costa Rica para caracterizar el biocarbón.

Table 3. Analyses performed in Costa Rica to characterize biochar.

Característica	Categoría IBI*	Método de análisis	Laboratorio	Referencias
Tamaño de partícula	A	Tamizado progresivo con cribas de 50, 25, 16, 8, 4, 2, 1, y 0,5 mm.	CICA, UCR Ing. Agrícola, ITEC	Soto <i>et al.</i> (2012) Pérez-Martínez (2015) Segura-Chavarría (2018)
Contenido de humedad (%)	A	Gravimétrico a 105 °C	CICA, UCR CEQIATEC y Ing. Agrícola del TEC	Segura- Chavarría (2018) Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020b)
Retención de humedad	-	Humedad a potenciales mátricos de -1, -2, -3, -6, -10, -33, -50, -1500kPa	Ing. Agrícola, TEC	Villagra-Mendoza <i>et al.</i> (2021)
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	A	Conductímetro	CIA, UCR CEQIATEC, TEC	Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020a), Segura- Chavarría (2018)
pH	A	CaCl ₂ , Agua y HCl	CICA, UCR CEQIATEC, TEC	Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020a) Segura-Chavarría (2018)
Análisis elemental de carbono, nitrógeno e hidrógeno y azufre (%)	-	Autoanalizador elemental 2400, método de combustión seca	CICA, UCR Forestal, TEC	Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020a)
Carbono orgánico (Corg)	A	Estimado por sustracción del C inorgánico eq del C total	CICA, UCR CEQIATEC, TEC	Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020a)
Capacidad encalante del biocarbón	A	Saturación con HCl y determinación de HCl remanente con NaOH	CICA, UCR CEQIATEC, TEC	Segura-Chavarría (2018)
Prueba de germinación	B		CICA, UCR CEQIATEC, TEC	Pérez-Salas <i>et al.</i> (2013) Rubio (2014)
Metales pesados	B	Absorción atómica	CIA, UCR CEQIATEC, TEC	Segura-Chavarría (2018)
Contenido de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg)	C	Extracción con KCl, y Olsen y	CIA UCR	Moyano <i>et al.</i> (2012) Pérez-Salas <i>et al.</i> (2013)
Análisis proximal (materia volátil, carbono fijado y ceniza)	A	ASTM D 3172-13 con mufla	CICA, UCR	Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020a)
		Combustión seca	Forestal, TEC	
H: C _{org}	A	ASTM D 3172-13 con mufla	CICA, UCR	Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020a)
		Combustión seca	CEQIATEC, TEC	Segura-Chavarría (2018)
Hidrofobicidad	-	Técnica de gota sésil	CEQIATEC, TEC	Segura-Chavarría (2018)
Capacidad intercambio catiónico y aniónico	-	Extracción con KCl 1 M	CEQIATEC, TEC y CIA, UCR	Segura- Chavarría (2018)
Microscopía electrónica de barrido	-	Equipo TM 3000	Laboratorio de Microscopía del TEC y el de la UCR	Chin-Pampillo <i>et al.</i> (2020a) Segura-Chavarría (2018)
Brunauer–Emmett–Teller (BET) o Área Superficial Específica	-	Isotermas de nitrógeno para el cálculo de micro y mesoporosidad	CEQIATEC, TEC	Villagra-Mendoza <i>et al.</i> (2021)
Densidad esquelética	-	Picnometría con nitrógeno	CEQIATEC, TEC	Villagra-Mendoza <i>et al.</i> (2021)
Termogravimetría	-	A SDT Q600, TA Instruments	CEQIATEC, TEC	Villagra-Mendoza <i>et al.</i> (2021)

*Clasificación según categorías de la Iniciativa de Biocarbón Internacional (IBI). Donde A son Análisis Básicos, B son Análisis para determinar el efecto tóxico potencial del biocarbón y C Análisis avanzados que apoyan a determinar el impacto del biocarbón como mejorador de suelos (IBI 2015).

Tabla 4. Análisis de diferentes tipos biocarbón utilizando una digestión completa por el Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

Table 4. Analysis of different types of biochar using complete digestion by the Soil Laboratory at the Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

Materia prima del Biocarbón	N	C	Humedad	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B	pH	Conductividad eléctrica
	(%)			(mg kg ⁻¹)											(mS cm ⁻¹)
<i>Gmelina arborea</i> en horno de estañón ¹	0,35	4	7	0,03	1,10	0,13	0,74	0,02	2596	4	38	31	16	9,10	0,61
<i>Gmelina arborea</i> + Fósforo ¹	0,36	2	11	1,50	5,33	0,15	0,32	0,05	3248	11	51	187	28	7,61	0,34
<i>Gmelina arborea</i> + gallinaza ¹	0,45	5	30	1,52	3,67	0,67	0,41	0,12	24174	31	99	449	30	6,95	1,38
<i>Psidium guajava</i> en horno de fosa ¹	0,59	-	-	0,07	1,36	0,14	0,43	0,06	13295	25	64	206	-	-	-
<i>Cordia alliodora</i> ²	0,77	-	-	0,23	2,64	0,38	0,50	0,10	6290	162	-	-	-	9,1	-
Pinzote de palma aceitera ³	1,45	-	-	0,25	1,00	0,54	2,74	0,11	17072	68	158	228	20	-	-

1: Adaptado de Soto *et al.* (2012). 2: Adaptado de Madriz (2019). 3: Adaptado de Marín-Guzmán (2022).

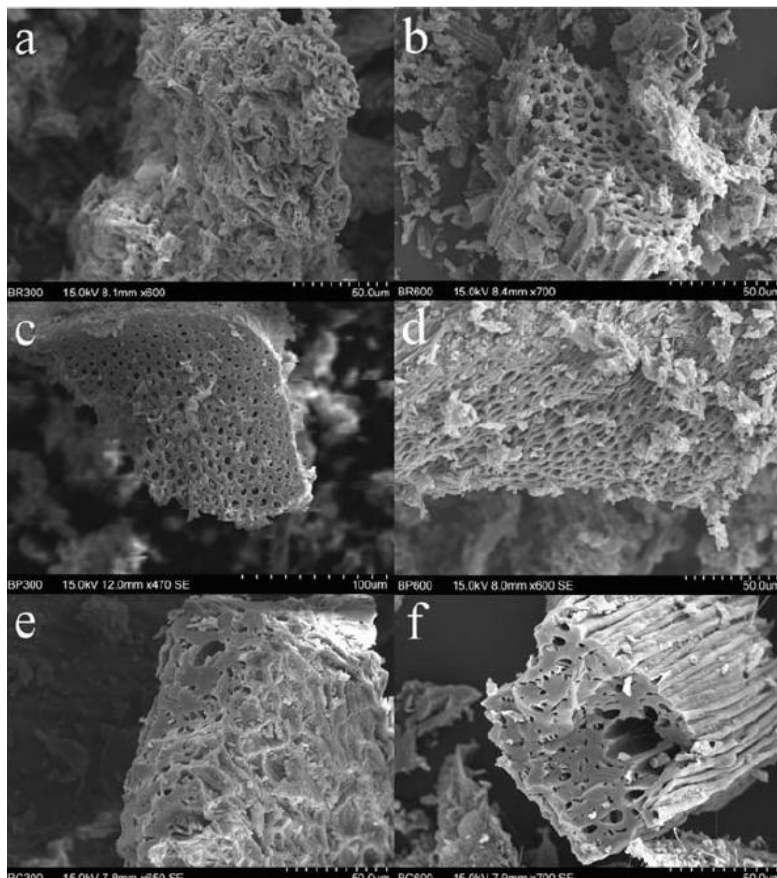


Figura 2. Imágenes de microscopía electrónica de biocarbón de A) rastrojo de piña a 300 °C; y B) a 600 °C; C) pinzote de palma aceitera a 300 °C, y D) a 600 °C, E) pergamino de café a 300 °C y F) a 600 °C. Adaptado de Chin-Pampillo *et al.* (2020b).

Figure 2. Electron microscopy images of biochar from A) pineapple straw at 300 °C; and B) at 600 °C; C) oil palm stalk at 300 °C, and D) at 600 °C; E) coffee parchment at 300 °C and F) at 600 °C. Adapted from Chin-Pampillo *et al.* (2020b).

Caracterización del biocarbón según materia prima y condiciones de producción

El biocarbón que se produce depende esencialmente de dos factores: a) el tipo y la condición de la materia prima (contenido de lignina, contenido de humedad, granulometría, etc.), y b) las condiciones de la pirólisis (temperatura y duración), que dependen del tipo y manejo del horno. Chin-Pampillo *et al.* (2021) evaluaron el efecto de la temperatura (300 y 600 °C) de pirólisis sobre las características del biocarbón de rastrojo de piña, pinzote de palma aceitera y cascarilla de café, donde se observó cómo dicha temperatura puede modificar el producto final en su contenido de carbono y nitrógeno, así como su porosidad y el pH (**Tabla 5**).

Tabla 5. Efecto de la temperatura de pirólisis sobre las características del biocarbón de tres residuos agrícolas: el rastrojo de piña, el pinzote de palma aceitera y el pergamino de café, evaluado en una mufla por 1 hora (Chin-Pampillo *et al.* 2020a).

Table 5. Effect of pyrolysis temperature on the biochar characteristics of three agricultural residues: pineapple straw, oil palm stalk, and coffee parchment, evaluated in a muffle furnace for one hour (Chin-Pampillo *et al.* 2020a).

Materia prima	Temperatura	pH	C	N	P	K
	°C		%		ppm	
Rastrojo de piña	300	6,9	4,0	1,4	3,2	2,7
Rastrojo de piña	600	9,4	56,8	1,2	5,8	4,3
Pinzote de palma aceitera	300	7,1	61,2	1,2	3,8	2,5
Pinzote de palma aceitera	600	9,5	63,3	0,8	4,5	4,9
Pergamino de café	300	6,9	59,3	0,6	1,4	0,9

Otro ejemplo es el caso de la comparación entre dos materias primas: bambú y madera en el horno de estañones, donde se observó que el bambú produce mayores porcentajes de ceniza y menores contenidos de carbón fijado que la madera (**Tabla 6**) (Segura-Chavarría 2018).

Uso de biocarbón como mejorador de suelos y desarrollo del cultivo

El impacto de la aplicación de biocarbón sobre características de suelo y el desarrollo de los cultivos se ha investigado en cultivos como palma aceitera (Benjamin *et al.* 2012, Soto *et al.* 2012), cacao (Hojah da Silva 2013, Acosta 2014, Alpizar-Alfaro 2016), hortalizas (Henreaux 2012, Madriz 2019, Villagra-Mendoza *et al.* 2021), banano (Salas y Araya 2009), café (Rubio 2014) y caña de azúcar (DIECA 2020).

Tabla 6. Análisis proximal y análisis elemental de biocarbón de bambú y madera producido en horno de estañones en el TEC (Segura-Chavarría 2018).

Table 6. Proximate analysis and elemental analysis of bamboo and wood biochar produced in “metal oil drums” at the TEC (Segura-Chavarría 2018).

Propiedad	Unidades	Materia prima	
		Bambú	Madera
Temperatura promedio	°C	441	549
Temperatura máxima	°C	748	722
Materia volátil	% (m m ⁻¹)	44,1	44,6
C fijado	% (m m ⁻¹)	22,3	39,0
Ceniza	% (m m ⁻¹)	24,3	9,6
C	% (m m ⁻¹)	64	76,9
N	% (m m ⁻¹)	0,4	0,2
H	% (m m ⁻¹)	2,1	2,4
O	% (m m ⁻¹)	33,4	20,4
H/C		0,03	0,03
Capacidad de Intercambio Catiónico	cmol _c kg ⁻¹	14,8	5,2

Palma aceitera. En Puerto Escondido y San Juan Sierpe, en el Cantón de Osa de Puntarenas, Benjamin *et al.* (2012), con la colaboración de la Cooperativa de Productores de Palma Aceitera OSACOOOP, se evaluó la aplicación de 10 t ha⁻¹ de biocarbón al fondo del punto de siembra de palma aceitera, y una segunda aplicación de 10 t h⁻¹ al año del trasplante, alrededor de la planta. El biocarbón fue elaborado en un horno de estañones (Lerner *et al.* 2019) a base de desechos de tarimas de melina (*Gmelina arborea*). En Puerto Escondido, en un Inceptisol alto en bases, no se observaron diferencias significativas en el desarrollo de las plantas. Caso contrario fue en el Ultisol ubicado en San Juan Sierpe, donde sí se observaron diferencias significativas en altura de plantas, número de racimos por planta y peso por racimo en los tratamientos de biocarbón más urea y BMC (biocarbón más gallinaza) (**Figura 3**) (Soto *et al.* 2012, Benjamin *et al.* 2012).

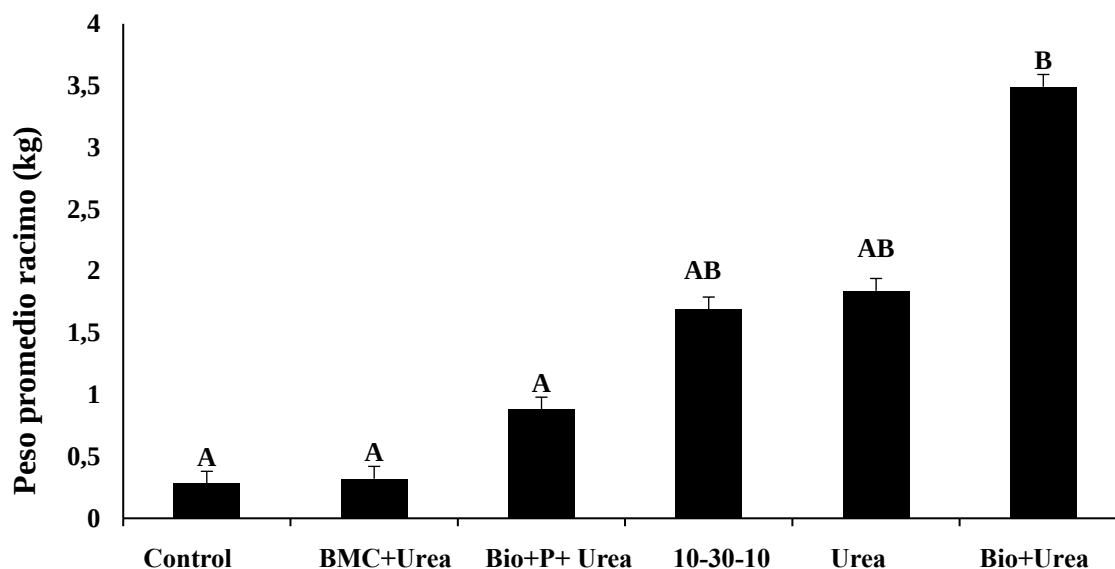


Figura 3. Peso promedio de racimo de fruta de palma aceitera (kg) por planta de 3 años con aplicación de biocarbón y fertilizantes sintéticos, en un Ultisol en San Juan Sierpe, Osa, Puntarenas ($n = 12$). Las barras representan desviación estándar. Valores seguidos por una misma letra no presentan diferencia significativa. Adaptado de Soto *et al.* (2012).

Figure 3. Average fruit bunch weight (kg) per 3-year-old oil palm plant with biochar and synthetic fertilizer application in an Ultisol soil in San Juan Sierpe, Osa, Puntarenas ($n = 12$). Bars represent standard deviation. Values followed by the same letter do not differ significantly. Adapted from Soto *et al.* (2012).

Cacao. En los jardines clonales de cacao establecidos por el CATIE y la Asociación de Pequeños Productores Orgánicos de Talamanca (APPTA) en las comunidades de Watsi (Inceptisol) y Suretka (Ultisol), se evaluó la aplicación de 2 kg de biocarbón + 1 kg de gallinaza planta adulta⁻¹, además de las correspondientes dosis de biocarbón y gallinaza independientes (Hojah da Silva 2013). A los siete meses de la aplicación, no se observaron diferencias significativas en frutos por árbol, pero sí se observó un mayor peso húmedo de semillas por fruto el tratamiento de biocarbón más gallinaza (Hojah da Silva 2013).

Asimismo, se evaluó la aplicación de biocarbón en el almácigo de cacao, se observó una altura 22% por encima del control con el tratamiento de biocarbón y gallinaza, tanto en altura como diámetro de las plántulas de 2 meses (Hojah da Silva 2013). Al año de la aplicación inicial de biocarbón, se observó que en ambos suelos se redujo la acidez, mejoró el pH, aumentó el contenido de calcio en el suelo y el contenido de materia orgánica (Acosta 2014). Este efecto fue leve en el suelo Inceptisol y mayor en el Ultisol.

Tres años después del establecimiento de estos ensayos, se evaluó el impacto de la aplicación del biocarbón más la gallinaza sobre el contenido de cadmio (Cd) en el suelo y en la semilla de cacao, así como sobre la micorrización del cacao, pero no observó ningún efecto significativo con respecto a la aplicación de biocarbón (Alpízar-Alfaro 2016). Adicionalmente se observaron diferencias significativas por tipo de suelo, donde las semillas de cacao en la región de Suretka (Ultisol) tenían un contenido menor de Cd ($0,32 \text{ mg kg}^{-1}$ de semilla seca de cacao), que las semillas de Watsi (Inceptisol) ($0,78 \text{ mg kg}^{-1}$ de semilla de cacao), pero no observó que la aplicación de biocarbón afectara la absorción del Cd por las plantas (Alpízar-Alfaro 2016).

Hortalizas. En estudios anteriores, se evaluó el efecto de biocarbón de bambú producido en horno de estañones (450 a $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$), en mezcla con microorganismos benéficos *Trichoderma harzianum* (IMI 395248) y *Bacillus subtilis* (AB4410), con o sin gallinaza y fertilizantes sintéticos (nitrato de amonio), sobre la producción de tomate (*Lycopersicum esculentum*), pepino (*Cucumis sativus*) (Henreaux 2012, Soto *et al.* 2012) y vainica (*Phaseolus* sp.) en un suelo Inceptisol en Turrialba (Henreaux 2012). En tomate, en campo se observó un mayor crecimiento de los tratamientos con biocarbón de un 19 a un 23%, sobre todo en los tratamientos en mezcla con gallinaza. La respuesta con el lombricompost fue errática y no se observó un mayor efecto en el tratamiento lombricompost + biocarbón vs solo lombricompost, como sí se observó con la gallinaza (Henreaux *et al.* 2012). En el caso de pepino, se observó la mayor producción en el tratamiento de biocarbón más gallinaza, mucho mejor que biocarbón más el fertilizante inorgánico. La adición de microorganismos mostró un efecto positivo en el caso de la adición de biocarbón y gallinaza (**Figura 4**) (Henreaux 2012, Soto *et al.* 2012).

Por otro lado, Madriz (2019) observó un efecto contrario, donde el mayor crecimiento y la mayor producción del pepino se dio en el tratamiento lombricompost más biocarbón. En este caso, el biocarbón fue elaborado en un horno de estañón con madera de *Cordia alliodora* (**Tabla 1**), y el lombricompost a partir de excretas de vaca en la Finca Santa Lucía, de la Universidad Nacional. Villagra-Mendoza *et al.* (2021) evaluaron el efecto de biocarbón de bambú (*Guadua angustifolia*) en la producción de tomate (variedad Montaña Fresca), bajo invernadero, en un suelo franco arenoso y uno franco limoso y observaron un aumento significativo de tomates clase A y B en el suelo franco arenoso.

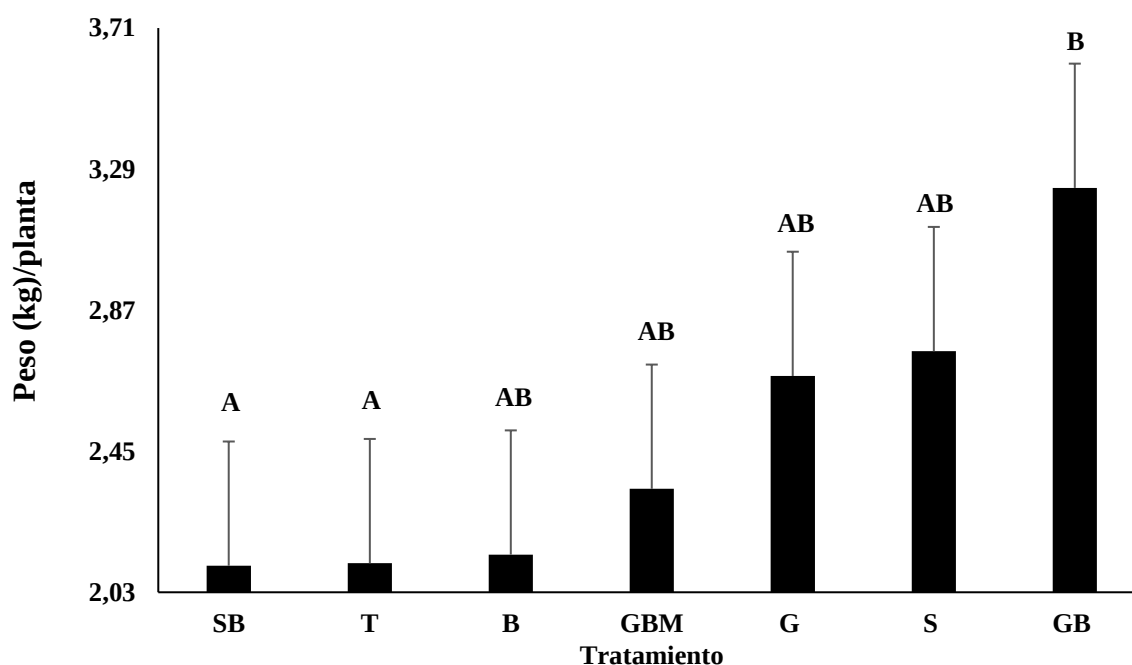


Figura 4. Aplicación de biocarbón con gallinaza sobre la producción de pepino (*Cucumis sativus*) en Turrialba, Costa Rica. Los tratamientos fueron B: biocarbón, G: gallinaza, SB: fertilizante inorgánico (nitrato de amonio) + biocarbón, T: Testigo GBM: Gallinaza + Biocarbón + *Bacillus subtilis* + *Trichoderma harzianum*; G: Gallinaza; S: Fertilización mineral; GB: Gallinaza + biocarbón. Las barras de error representan el error standard y las letras sobre las columnas se refieren a diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Fuente: Soto *et al.* (2012).

Figure 4. Application of biochar with chicken manure on cucumber (*Cucumis sativus*) production in Turrialba, Costa Rica. Treatments were B: biochar, G: chicken manure, SB: inorganic fertilizer (ammonium nitrate) + biochar, T: Control; GBM: Chicken manure + Biochar + *Bacillus subtilis* + *Trichoderma harzianum*; G: Chicken manure; S: Mineral fertilization; GBM: Chicken manure + Biochar. Error bars represent standard error, and letters above columns indicate significant differences ($p \leq 0.05$). Source: Soto *et al.* (2012).

Biocarbón y características hidráulicas de suelo

Estudios realizados por el Instituto Tecnológico de Costa Rica en colaboración con la Universidad Christian Albrecht de Kiel, en Alemania, han demostrado que la adición de biocarbón al suelo afecta las propiedades de este, como por ejemplo las características físicas, hidráulicas y mecánicas (Villagra-Mendoza *et al.* 2017, Villagra-Mendoza y Horn 2018b, 2018a).

Villagra-Mendoza *et al.* (2017) evaluaron el impacto de la adición de diferentes dosis de *Terra Preta* (TP) (20, 30 y 50%) a un suelo arenoso limoso sobre la tasa de infiltración, mediante un simulador de lluvia de 22 mm hora⁻¹. Se entiende como *Terra Preta* una mezcla el biocarbón con residuos orgánicos, que se utiliza como enmienda para mejorar los suelos bajo una visión de sostenibilidad (Villagra-Mendoza *et al.* 2017).

Los resultados mostraron que la capacidad del suelo de retener agua aumentó con el contenido de materia orgánica, la relación percolación/infiltración fue mayor con la dosis de 30% de *Terra Preta*, comparada con la dosis de 20%. Estos datos anteriores muestran que, aunado a otras prácticas de conservación de suelos, como el uso de coberturas vivas, el biocarbón tiene potencial de ayudar en aumentar la infiltración y reducir la escorrentía en suelos arenosos.

De forma similar, se ha evaluado el efecto de la adición de biocarbón de madera sobre la conductividad hidráulica de un suelo arenoso, y un suelo arenoso limoso, en condiciones saturadas y no saturadas. En el caso del suelo arenoso, la conductividad hidráulica fue mayor (hasta -40k Pa) a mayor contenido de biocarbón. Los resultados mostraron que, en condiciones de suelo no saturado, la adición de biocarbón mejoró el transporte del agua al reducir el número de poros mayores y los poros entre partículas (Villagra-Mendoza y Horn 2018a). En otro ensayo Villagra-Mendoza y Horn (2018b) evaluaron el efecto de períodos alternos de sequía y humedecimiento sobre la conductividad hidráulica y la retención de agua, para dosis de 2,5 y 5% de biocarbón de madera de mango en un suelo arenoso y un suelo arenoso limoso, y observaron una mayor retención de agua en los suelos con biocarbón. Con la adición de biocarbón, se observó una reducción de la fracción de poros gruesos anchos y aumentó la meso porosidad. Los ciclos de secado mejoraron la estabilidad estructural del sistema de poros y aumentaron la conductividad hidráulica saturada.

Villagra-Mendoza *et al.* (2021) evaluaron los cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo franco arenoso y uno franco limoso, y su relación con la producción de tomate en invernadero, al aplicar biocarbón de bambú en dosis de 1, 2,5 y 5% (peso seco). La producción de tomate clase A aumentó un 350% en el franco arenoso y 151% en el franco limoso. Concluyeron que la respuesta de la producción de tomate se debía principalmente a los cambios de contenido de humedad en términos de agua útil y capacidad del aire, pues no se observaron cambios en propiedades nutricionales.

Biocarbón para el manejo de plagas

El uso del biocarbón en mezcla con microorganismos benéficos también ha sido evaluado para el manejo de plagas y enfermedades en diversos cultivos. En Costa Rica, se ha evaluado en mezcla con gallinaza, lombricompost y microorganismos benéficos (*Trichoderma harzianum* IMI 395248 y *Bacillus subtilis* AB4410) en tomate y pepino (Henreaux 2012), y en mezcla con lombricompost y el bioestimulante Robust® (*Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis*) sobre la incidencia de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) (Madriz 2019). Sin embargo, en ambos casos, los resultados no fueron conclusivos de mejoras en el manejo de plagas con el biocarbón, aunque se observaron mejoras en el desarrollo de las plantas.

Contrario al estudio de Madriz (2019), existen estudios donde se encontraron impactos positivos en el control del nematodo *Radopholus similis*, en banano Cavendish en invernadero, y el control de *Fusarium* en banano (Acosta 2014; Salas y Araya, 2009) (**Tabla 7**). En adición, se ha evaluado el efecto del biocarbón en la retención de plaguicidas. Al respecto, Chin-Pampillo *et al.* (2020b) evaluaron el efecto de la adición de 10 a 20 t ha⁻¹ de biocarbón de rastrojo de piña, pinzote de palma y cascarilla de arroz en la retención del Bromacil y Diuron en el suelo, y observaron que, con la adición del biocarbón de palma aceitera, aumentó el coeficiente de sorción (K_{oc}) del Diurón 3,5 veces en comparación con el testigo. No se observó un efecto sobre persistencia de los plaguicidas (Chin-Pampillo *et al.* 2020).

Biocarbón compostaje y poblaciones microbianas

Diversos autores han evaluado la aplicación de biocarbón con microorganismos como *Trichoderma harzianum* y *Bacillus subtilis* (Henreaux 2012, Henreaux *et al.* 2012, Soto *et al.* 2012), microorganismos endófitos (*Bacillus aryabhattai* y *Burkholderia cepacia*) (Acosta 2014), comunidades nativas de microorganismos (Salas y Araya 2009, Pérez-Salas *et al.* 2013) y microorganismos de montaña (Acosta 2014, Carmona, enero 2022. Comunicación personal), con resultados que, por lo general, muestran un mejor desempeño del biocarbón en presencia de microorganismos benéficos. Se evaluó el porcentaje de colonización de micorrizas en banano en invernadero después de la aplicación de altas dosis (40, 80, 120 t ha⁻¹) de biocarbón de guayaba (*Psidium guajava*), y se observó un incremento en la colonización conforme aumentó la dosis (Soto *et al.* 2012).

Rubio (2014) evaluó el efecto de la adición de biocarbón de *Gmelina arborea* en la producción de compost (0, 5, 10 y 15% de biocarbón) y lombricompost (0, 6, 13 y 27% de biocarbón) en mezcla con pulpa de café (**Figura 5**), y su efecto sobre la producción de almácigos de café en CoopePilangosta, Hojancha, Guanacaste. No se observaron diferencias significativas en el proceso de producción de compostaje (temperatura, humedad, o pH) o en la sobrevivencia de las lombrices, por lo que el proceso de producción de los abonos no se vio afectado por la adición del biocarbón. Sí se observó un aumento significativo en el área (cm²) de la raíz conforme se incrementaron las dosis de biocarbón en el compost.

Tabla 7. Investigación realizada en Costa Rica utilizando biocarbón en mezcla con microorganismos benéficos para el manejo de plagas.

Table 7. Research conducted in Costa Rica using biochar mixed with beneficial microorganisms for pest management.

Cultivo	Biocarbón (material y dosis)	Adición	Plaga	Resultado	Referencias
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	<i>Gmelina arborea</i> (20 T ha ⁻¹)	Gallinaza + <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Bacillus subtilis</i>	<i>Ralstonia solanacearum</i> + <i>Pseudomonas corrugata</i>	13% más biomasa y retraso de la mortalidad	Henreaux (2012)
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	<i>Gmelina arborea</i> (20 T ha ⁻¹)	Gallinaza + lombricompost + <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Bacillus subtilis</i>	Mosca blanca (<i>Bemisia tabaci</i>)	Ningún efecto	Henreaux (2012)
Pepino (<i>Cucumis melo</i>)	<i>Cordia alliodora</i> (15 T ha ⁻¹)	Lombricompost + Robust® (<i>Pseudomonas fluorescens</i> y <i>Bacillus subtilis</i>)	Mosca blanca (<i>Bemisia tabaci</i>)	No se observó ningún efecto en adultos y ninfas	Madriz (2019)
Banano Cavendish (<i>Musa acuminata</i> Cavendish)	<i>Gmelina arborea</i> (20 T ha ⁻¹)	-	<i>Fusarium oxysporum</i> f. s. cubense raza 1 (Foc)	Mayor crecimiento, pero no reducción de <i>Fusarium</i>	Pérez Salas <i>et al.</i> (2013)
Banano Gross Michel (AAA) (<i>Musa acuminata</i> AAA)	<i>Gmelina arborea</i> , bagazo de caña de azúcar y leña (20 T ha ⁻¹)	Microorganismos Endófitos: <i>Bacillus aryabhattai</i> y <i>Burkholderia cepacia</i> y <i>Trichoderma sp.</i> y Microorganismos de Montaña	<i>Fusarium oxysporum</i> f. s. cubense raza 1 (Foc)	Menor severidad Con los tres tipos de biocarbón + microorganismos endófitos	Acosta (2014)
Banano Cavendish (<i>Musa acuminata</i> Cavendish)	Guayaba (<i>Psidium guajava</i>) (1,7 T ha ⁻¹)	Comunidades de microorganismos nativos (CMN) + harina de rocas	Nematodos totales y población de <i>Radopholus similis</i>	Disminución de la población del nematodo en un 83%	Salas y Araya (2009)
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	<i>Gmelina arborea</i> (20 T ha ⁻¹)	+ Gallinaza	<i>Moniliophthor roreri</i> y <i>Phytophthora palmivora</i>	No diferencias significativas en incidencia de enfermedades	Acosta, (2014) Henreaux (2012)

Segura Chavarría (2018) observó que la adición de biocarbón de bambú y madera (**Tabla 2**), con compost de pergamino de café y residuos sépticos, afectó el agua disponible en el compost. El biocarbón de bambú fue el que aumentó en mayor medida (10%) la retención de agua en el compost. Las mezclas de biocarbón + compost llegaron a retener entre un 80% y un 118% del agua disponible. Esto puede tener implicaciones de uso en el suelo y en las condiciones de cambio climático actuales. Los productores de la zona de Alfaro Ruiz han utilizado carbón como ingrediente del abono bocashi por más de 20 años (Soto y Joseph 2009, Sazaki 1999). Inicialmente, los productores producían su propio carbón en carboneras de suelo; sin embargo, desde el año 2005, la Cooperativa CoopeBrisas inició la producción a gran escala de bocashi, que utiliza carbón proveniente de los ingenios de caña de azúcar.

Aunque los productores aplican bocashi desde hace varios años con dosis de hasta 10 t ha⁻¹ (orgánicos) y 2 t ha⁻¹ (convencionales), la mayoría desconoce las ventajas de su uso (Moyano *et al.* 2012). Al ser suelos Andisoles altos en materia orgánica (Alvarado *et al.* 2001), no se observó diferencia significativa en el contenido de carbono en el suelo con la aplicación consecutiva del bocashi en una en la producción de hortalizas variables. Pero sí se observó una variación en la estructura del suelo, donde los productores orgánicos con más años de aplicar bocashi presentaron un mayor porcentaje de su suelo en agregados de 8 a 2 mm y de 250 µm (Moyano *et al.* 2012). Lo que implica una mayor infiltración de agua, mayor actividad microbiana, lo que conlleva un uso más eficiente de los fertilizantes y un mejor manejo de las plagas del suelo.

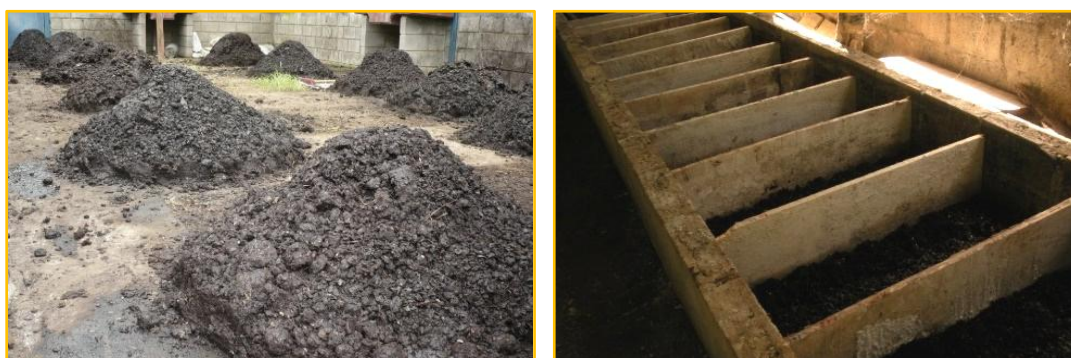


Figura 5. Ensayo de compost y lombricompost con diferentes dosis de biocarbón realizado en los invernaderos de la Finca Santa Lucía de la Universidad Nacional (izquierda), y en la Cooperativa Pilangosta (derecha), en Hojancha, Nicoya, Guanacaste Fotos cortesía de J. Rubio).

Figure 5. Compost and vermicompost test with different doses of biochar carried out in the greenhouses of the Santa Lucía Farm of the National University (left), and in the Pilangosta Cooperative (right), in Hojancha, Nicoya, Guanacaste Photos courtesy of J. Rubio).

Conclusiones

Las investigaciones realizadas hasta la fecha, en cultivos tropicales como palma aceitera, cacao, hortalizas y banano, han mostrado el potencial del biocarbón como mejorador de suelo en suelos ácidos y en suelos de textura arenosa, donde mejoran la retención del agua. El efecto sobre la nutrición se mejora cuando se mezcla con una fuente de nitrógeno como gallinaza.

Las propiedades del biocarbón como mejorador de suelos varían según el tipo de material que sea pirolizado y la temperaturas de pirólisis. Los estudios realizados parten de diferentes condiciones de producción, diferentes formas de proceso y algunos están limitados por faltas de repeticiones estadísticas por lo que es difícil concluir sobre el que presenta las mejores características.

Un resultado controversial observado fue la escasa respuesta de la adición de biocarbón al compost, lo que entró en contradicción con la literatura en el tema. Esta diferencia es posible a limitaciones metodológicas como un número reducido de variables microbiológicas y al tipo de suelo utilizado.

En todos los proyectos de investigación revisados, se priorizó la utilización de materias primas residuales de la agroindustria, lo que contribuye a la economía circular de la agroindustria existente. Si el biocarbón se puede producir y utilizar localmente, se reducen los costos de transporte, tanto de la materia prima como del producto final. Para lograrlo, es necesario el desarrollo de una planificación regional de producción y uso de biocarbón en el país, información que no se encontró en los documentos revisados.

Entre las prioridades de investigación pendientes están: la optimización de los hornos a pequeña escala para uso en finca; el diseño de hornos a gran escala, con mejor aprovechamiento de la energía generada y de los subproductos como aceites; y el análisis de diferentes tipos de materias primas recalcitrantes como el pinzote de palma aceitera y el efecto del biocarbón en el suelo en el largo plazo. Con estas primeras conclusiones, se puede priorizar que el uso de biocarbón se debe favorecer en zonas de suelos ácidos como Pérez Zeledón, y zonas con suelos arenosos, donde el uso de biocarbón tiene el potencial de extender la retención de agua en el suelo por más tiempo luego del período de lluvias.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento brindado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT) para la realización del proyecto BIOECODEs “El BIOcarbón como estrategia de ECONOMÍA circular: valorización de residuos agroindustriales para la DESCARBONIZACIÓN y la protección de los recursos” inscrito como 802-CO-518 en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Así como el apoyo de la Vicerrectoría de Investigación para la participación de la M.Sc. Gabriela Soto en esta publicación. En memoria del Ing. Marco Corrales Soto Investigador del Instituto de Transferencia Agropecuaria y quien era colaborador de este proyecto.

Literatura citada

Acosta, JO. 2014. Efecto del biocarbón en cacao orgánico (*Theobroma cacao* L.) y manejo biológico del Mal de Panamá (*Fusarium oxysporum* f.sp cubense) con biocarbón y microorganismos benéficos. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 120 p. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7142>

Alpizar-Alfaro, AI. 2016. Efecto del biocarbón y la gallinaza sobre la colonización micorrízica en raíces de cacao (*Theobroma cacao* L.) y los niveles de cadmio en suelo, raíces y semillas de dos fincas agroforestales de cacao. Talamanca, Costa Rica. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional (UNA). 95 p.

Alvarado, A; Bertsch, F; Bornemisza, E; Cabalceta, G; Henríquez, C; Mata, R; Molina, E; Salas, R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas, UCR y COSTACAN.

Behera, S; Samal, K. 2022. Sustainable approach to manage solid waste through biochar assisted composting. Energy Nexus, 7, 100121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100121>

Benjamin, T; Soto, G; Major, J; Lerner, R; Covell, P; Muñoz, M; Muñoz, L; Solórzano, A; Joseph. 2012. The effectiveness of using biochar for palm oil establishment in different soil types in Costa Rica. 4th International Congress EuroSoil: S05.03a-6.

Chin-Pampillo, JS; Alfaro-Vargas, A; Rojas, R; Giacomelli, CE; Perez-Villanueva, M; Chinchilla-Soto, C; Alcañiz, JM; Domene, X. 2020a. Widespread tropical agrowastes as novel feedstocks for biochar production: Characterization and priority environmental uses. *Biomass Conversion and Biorefinery* 11(5):1775-1785. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00714-0>

Chin-Pampillo, JS; Alfaro-Vargas, A; Rojas, R; Giacomelli, CE; Perez-Villanueva, M; Chinchilla-Soto, C; Alcañiz, JM; Domene, X. 2020b. Widespread tropical agrowastes as novel feedstocks for biochar production: Characterization and priority environmental uses. *Biomass Conversion and Biorefinery*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00714-0>

Chin-Pampillo, JS; Perez-Villanueva, M; Masis-Mora, M; Mora-Dittel, T; Carazo-Rojas, E; Alcañiz, JM; Chinchilla, C; Domene, X. 2020. Amendments with pyrolyzed agrowastes change the sorption and persistence of bromacil and diuron without mitigating their predicted environmental risks in a tropical soil. *Science of the total environment*. Volume 772, 2021, 145515, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145515>

Chin-Pampillo, JS; Perez-Villanueva, M; Masis-Mora, M; Mora-Dittel, T; Carazo-Rojas, E., Alcañiz, JM; Chinchilla-Soto, C; Domene, X. 2021. Amendments with pyrolyzed agrowastes change bromacil and diuron's sorption and persistence in a tropical soil without modifying their environmental risk. *Science of the Total Environment* 772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145515>

Díaz Perez, J. 2025. Efecto del biocarbón inoculado sobre las propiedades del suelo y el rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en Pejibaye de Pérez Zeledón, Costa Rica. Tesis Lic. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/25734>

DIECA (Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar). 2020. Informe de Resultados Programa Nacional de Producción y Desarrollo de insumos biotecnológicos (en línea). Disponible en <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/article/B6C0F5D13A2F4D45E053E8E1A9C002FD>

Donnelly, A; Selting, K; Ternes, T. 2014. The Estufa Finca-Talamanca Project 2011-2014 (en línea). Great Energy Challenge, National Geographic. Disponible en https://stoves.bioenergylists.org/files/estufa_finca_report.pdf

EBC (European Biochar Foundation). 2022. European Biochar Certificate - Guidelines for a sustainable production of biochar. En Version 10.1. p. 63.

Eltigani, A; Olsson, A; Krause, A; Ernest, B; Fridahl, M; Yanda, P; Hansson, A. 2022. Exploring lessons from five years of biochar-producing cookstoves in the Kagera region, Tanzania. *Energy for Sustainable Development* 71:141-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.09.015>

Gitau, KJ; Mutune, J; Sundberg, C; Mendum, R; Njenga, M. 2019. Factors influencing the adoption of biochar-producing gasifier cookstoves by households in rural Kenya. *Energy for Sustainable Development* 52:63-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.07.006>

Henreaux, J. 2012. Efecto del biocarbón combinado con fertilizantes orgánicos y microorganismos benéficos sobre el desarrollo, productividad y resistencia de las plantas, Turrialba, Costa Rica. Tesis M.Sc. Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. s.p. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4889>

Henreaux, J; Crozier, J; Hidalgo, E; Soto, G; Benjamin, T. 2012. Enhanced growth and induced systemic resistance by biochar combined with organic fertilizers and biocontrol agents. 4th International Congress EuroSoil S05.03-P-21.

Hojah da Silva, J. 2013. Impacto del uso de biocarbón sobre la calidad de suelos y producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en sistemas agroforestales, Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica. Tesis M.Sc. Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2349>

IBI (International Biochar Initiative). 2015. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil (en línea). International Biochar Initiative, November 23. Disponible en https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2020/06/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final2.pdf

Lerner, R; Selles, C; Borner, J. 2019. Hornito Rocket Retort. En Eurosoils. s.l. s.p.

Liu, Z; Dugan, B; Masiello, CA; Gonnermann, HM. 2017. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. PLoS ONE 12(6):1-19. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>

López-Aviles, AL. 2014. Evaluación participativa del Proyecto Estufa Finca en familias. Tesis M.Sc. Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7139>

Madriz, M. 2019. Efecto del biocarbón, lombricompost y Robust® aplicados al suelo sobre el desarrollo y tolerancia del pepino (*Cucumis sativus* L.) a la mosca blanca (*Bemisia tabaci* Gennadius) bajo condiciones de invernadero en Barva, Heredia. Tesis M.Sc. Costa Rica, Universidad Nacional. <http://hdl.handle.net/11056/22016>

Marín-Guzmán, AD. 2022. Efecto de la incorporación de biocarbón de pinzote de palma aceitera sobre las características químicas de retención de nitrógeno de un Alfisol, en la producción de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en invernadero. Tesis Lic. Costa Rica, Universidad de Costa Rica.s.p.<https://www.scribd.com/document/667058034/Tesis-Lic-Allan-Marin-Guzman-Sobre-Biochar>.

Mašek, O; Buss, W; Roy-Poirier, A; Lowe, W; Peters, C; Brownsort, P; Mignard, D; Pritchard, C; Sohi, S. 2018. Consistency of biochar properties over time and production scales: A characterisation of standard materials. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 132:200-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.020>

Masis-Meléndez, F; Segura-Chavarría, D; García-González, CA; Quesada Kimsey, J; Villagra-Mendoza, K. 2020. Variability of physical and chemical properties of TLUD stove derived biochars. Applied Sciences (Switzerland) 10(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/app10020507>

Moyano, B; Soto, G; Philippon, O. 2012. Efecto del Biochar en Andisoles, en la producción hortícola en Costa Rica. 1^{er} Congreso Internacional de Biotecnología y Biodiversidad. s.l. s.p.

Oduor, M; Xia, X; Nahayo, A; Liu, X; Khan, P; Pan, G. 2016. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma* 274:28-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029>

Pérez-Martínez, EY. 2015. Evaluación de un carbonizador portátil de bajo costo en la valoración de residuos biomásicos lignocelulósicos. Tesis Lic. Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. s.p. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6306>

Pérez Salas, R; Tapia, AC; Soto, G; 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*, XIV:66-100. DOI: <https://doi.org/10.15517/isucr.v14i27.10408>

Quesada-Kimzey, J. 2012. La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. *Tecnología en Marcha* 25(5):14-21. <https://www.redalyc.org/exportar cita.oa?id=699878362002>

Quesada Kimzey, J. 2014. Biomasa para energía renovable, biocarbón en suelos y secuestro permanente de carbono. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5623/carbonizacion_energia_renovable_biocarbon.pdf;sequence=1

Roa Gutiérrez, F; Quesada Kimzey, J. 2011. Evaluación de la pirólisis de algunos residuos agroindustriales problemáticos y plásticos. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5623/carbonizacion_energia_renovable_biocarbon.pdf;sequence=1

Rubio, J. 2014. Efecto del biocarbón de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) sobre el contenido de nutrientes de compost y lombricompost a base de pulpa de café y su efecto en plantas de café y sorgo. Tesis Lic. Heredia, Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional <https://sidalc.net/search/Record/KOHA-OAI-BVE:137045/Description>

Salas, E; Araya, M. 2009. Efecto individual y combinado de biocarbón (biochar), comunidades de microorganismos nativos (CMN) y harina de rocas sobre el crecimiento de plantas in vitro de banano (*Musa* AAA cv. Grande Naine) y la población de *Radopholus similis*. s.l. s.p.

Sazaki, S. 1999. La extensión del método orgánico para la agricultura en Alfaro Ruíz de Alajuela, Costa Rica (en línea). Disponible en: <https://repositorio.iiarte.ucr.ac.cr/handle/123456789/10549>

Scott, HL; Ponsonby, D; Atkinson, CJ. 2014. Biochar: An improver of nutrient and soil water availability - What is the evidence? *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 9(19):1-19. DOI: <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20149019>

Segura Chavarría, DM. 2018. Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta. Tesis Lic. Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10315>

Soto, G; Benjamin, T; Estrada, F; Pérez, R; de la Hoya, J; Henreaux, J; Rubio, J; Salas, E; Tapia, A. 2012. Biocarbón en la agricultura en Costa Rica: resultados preliminares. Congreso Nacional de Suelos, Costa Rica. s.p.

Soto, G; Chin, JS; Chinchilla, C; Villanueva, M. 2023. Manual de biocarbón para una agricultura sostenible: experiencias en Costa Rica. Primera edición. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, CICA. ISBN 978-9930-9712-3-9 s.p.

Soto, G; Joseph, S. 2009. 20 years of biochar in Costa Rica. Boletín IBI 2009.

Tomlinson, T; Uptake, W; Colonization, MF. 2012. Biochar field studies: An IBI research summary. November. p. 1-10. <https://www.yumpu.com/en/document/read/37729384/november-2012-international-biochar-initiative/2>

Villagra-Mendoza, K; Horn, R. 2018a. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma* 326:88-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.021>

Villagra-Mendoza, K; Horn, R. 2018b. Effect of biochar on the unsaturated hydraulic conductivity of two amended soils. *International Agrophysics* 32(3):373-378. DOI <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0025>

Villagra-Mendoza, K; Masís-Meléndez, F; QuesadaKimsey, J; García-González, CA; Horn, R. 2021. Physicochemical changes in loam soils amended with bamboo biochar and their influence in tomato production yield. *Agronomy* 11:(10). DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11102052>

Villagra-Mendoza, K; Ortiz-Malavassi, E; Otterpohl, R. 2017. Role of charcoal addition on infiltration processes and soil water content characteristics of a sandy loam soil. *CGIR Journal* 19 (1):9-15. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/3770>

Zhang, X; Wang, H; He, L. 2013. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. April 2014. *Environ Sci Pollut Res.* 20:8472-8483. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1659-0>



Agronomía Costarricense, Universidad de Costa Rica.

Se encuentra licenciada con [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Para mayor información escribir a rac.cia@ucr.ac.cr