



Nota Técnica

Biocarbón: Importancia como alternativa para el desarrollo sostenible en Costa Rica. Una revisión bibliográfica.

Biochar: Importance as alternative for sustainable development in Costa Rica. A bibliographic review.

|||||

Ricardo Ulate Molina¹

Federico Masís Melendez²

Karolina Villagra³

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Química
Correo: reulate@itcr.ac.cr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8970-4690>

² Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Química
Correo: masis@itcr.ac.cr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1456-7190>

³ Tecnológico de Costa Rica, Escuela de ingeniería Agrícola
Correo: kvillagra@itcr.ac.cr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2335-0615>



Fecha de recepción: 29 de octubre, 2024

Fecha de aprobación: 04 de julio, 2025

Vol. 11. Enero- diciembre 2025 (Publicación continua)

Ulate Molina, R. E., Masís Meléndez, F., & Villagra, K. (2025). Biocarbón: Importancia como alternativa para el desarrollo sostenible en Costa Rica. Una revisión bibliográfica. E-Agronegocios, 11(1), 66–95.
<https://doi.org/10.18845/ea.v11i1.7568>

 DOI: <https://doi.org/10.18845/ea.v11i1.7568>

Resumen

Durante los últimos 20 años, se han implementado medidas con miras a un cambio en el modelo socioeconómico mundial, buscando un equilibrio entre las necesidades de producción y los recursos disponibles. En América Latina, el alcance de dicho equilibrio es todo un reto, al contar con una economía basada en la extracción de recursos naturales. Analizar el impacto de la producción y uso de biocarbón en América Latina y, específicamente en Costa Rica, como alternativa para la consecución de objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Se hace una recopilación de 93 artículos acerca de la producción, uso e impacto de los biocarbones en América Latina. Se identifica el trabajo desarrollado con respecto a biocarbones en Costa Rica y se discute su relación con el cumplimiento de los ODS de industria, innovación e infraestructura, ciudades y comunidades sostenibles, producción y consumos responsables y acción por el clima, así como oportunidades para generar un mayor impacto en la sostenibilidad en el país. El uso de materiales carbonizados en América Latina ha tenido un crecimiento importante, y en Costa Rica ha logrado impactar de manera positiva en metas de los objetivos de desarrollo sostenible, en áreas relacionadas con producción agrícola, manejo de residuos y contaminación ambiental.

Palabras clave: Sostenibilidad, carbonización, residuos orgánicos, impacto nacional.

Abstract

During the last 20 years, measures have been implemented with a view to a change in the global socioeconomic model, seeking a balance between production needs and available resources. In Latin America, achieving this balance is a challenge, having an economy based on the extraction of natural resources. Aim. Analyze the impact of the production and use of biochar in Latin America and, specifically in Costa Rica, as an alternative for achieving sustainable development goals (SDG). Development. A compilation of 93 articles is made about the production, use and impact of biochars in Latin America. The work developed regarding biocarbons in Costa Rica is identified and its relationship with compliance with the SDG's of industry, innovation and infrastructure, sustainable cities and communities, responsible production and consumption and climate action is discussed, as well as opportunities to generate a greater impact on sustainability in the country. Conclusions. The use of carbonized materials in Latin America has had significant growth, and in Costa Rica it has managed to positively impact the goals of the sustainable development goals, in areas related to agricultural production, waste management and environmental pollution.

Key words: management systems, small companies, resilience, agri-food industry strategy.

Introducción

Como parte de las acciones para lograr un cambio en el paradigma de crecimiento económico y social del planeta, se firmó, en setiembre del 2015, la agenda 2030, la cual busca un crecimiento de manera equitativa entre las personas, en armonía con el ambiente (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2018). Se elaboraron 17 objetivos, con sus respectivas acciones e indicadores, conocidos como Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como una guía para lograr la implementación de un nuevo sistema socioeconómico sostenible. Los ODS están dirigidos hacia la erradicación de la pobreza y la hambruna, la igualdad social, la protección de recursos naturales, y el mejoramiento de la calidad de la educación, entre otros (ONU, 2018). Esto representa un gran compromiso de los actores sociales involucrados, debido a que se hace necesario el aporte de todos, con el fin de lograr políticas que promuevan el alcance e implementación de las metas propuestas por la ONU (Páez Vieyra, 2019).

En América Latina, la desigualdad generada por la baja productividad y el impacto negativo en el ambiente, son de preocupación para las autoridades gubernamentales (ONU, 2018). Históricamente, los gobiernos latinoamericanos han considerado los recursos naturales como ilimitados, lo cual ha llevado a un uso indiscriminado y falta de concientización sobre cómo utilizarlos correctamente, impactando negativamente el planeta, ya que 70 % de la biodiversidad mundial se conserva en esta zona del continente (Páez Vieyra, 2019). La crisis sanitaria producto de la Pandemia por COVID-19, generó un impacto negativo adicional en la consecución de los ODS, ya que la región latinoamericana fue muy afectada en los ámbitos sociales, ambientales y económicos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2021). Específicamente, se menciona que un 36 % de las metas a alcanzar para la consecución de los ODS en el 2030, sufrieron un retroceso o estancamiento, lo cual requerirá esfuerzos adicionales para lograr su cumplimiento (CEPAL, 2021). Costa Rica no es la excepción a la situación general de la región, donde se ha venido trabajando para lograr implementar acciones que fomenten la consecución de los ODS, a pesar de todas las diferentes problemáticas surgidas en los últimos tres años (CEPAL, 2021). Se han generado herramientas y evaluaciones de la vinculación de las políticas y aparatos estatales con los ODS, con el fin de poder lograr un mayor seguimiento de estos, en especial al objetivo relacionado con cambio climático (García Serrano, 2020).

La utilización de bioinsumos de fácil producción y acceso para la población de bajos recursos para lograr múltiples alcances de los ODS. Uno de estos materiales es el biocarbón, que puede llegar a generar un impacto directo positivo en el Desarrollo Sostenible (Kumar & Bhattacharya, 2020). El biocarbón puede tener múltiples usos tanto en la gestión ambiental (Fawzy et al., 2021; Quesada Kimzey, 2012; Zhang et al., 2012), como en las actividades agrícolas y forestales (Jin et al., 2021; Rodríguez Solís et al., 2021; Spokas et al., 2012), con múltiples beneficios ambientales (Bartoli et al., 2020; Lorenz & Lal, 2014). El objetivo de este trabajo es analizar el impacto de la producción y uso de biocarbón en América Latina y, específicamente en Costa Rica, como alternativa para la consecución de objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Referente Teórico

Generalidades del biocarbón.

El biocarbón es un material rico en carbono, que se produce a partir de la descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia o con limitado suministro de oxígeno, a temperaturas entre los 300 y 700 °C, a través del proceso conocido como pirólisis (Tomczyk et al., 2020). Las biomásas que se pueden utilizar en este proceso contemplan desechos vegetales de cultivos, estiércol y maderas, siendo una opción importante para el tratamiento alternativo de este tipo de residuos (Brewer, 2012). Por su alta capacidad recalcitrante, la utilización de los biocarbones, para la agricultura o como remediación, busca principalmente retener el carbono en el ambiente por períodos largos de tiempo, contrario al uso dado para la generación de energía (Schmidt et al., 2022).

Además de la pirólisis, la elaboración de biocarbones se puede dar por rutas tales como la torrefacción, la carbonización hidrotérmica, la gasificación (Bartoli et al., 2020). La torrefacción es muy utilizada para materiales lignocelulósicos y genera productos con un mayor valor energético que la materia inicial (Ghodake et al., 2021), además, por utilizar temperaturas bajas de producción (200-260 °C), es muy utilizado en la industria energética. La carbonización hidrotérmica es un proceso de descomposición polimérica, donde se convierte la biomasa húmeda a bioaceites, principalmente, utilizando condiciones moderadas de presión y temperatura (Bartoli et al., 2020). Por otro lado, la gasificación convierte la biomasa en productos gaseosos, con la aplicación de temperaturas superiores a los 750 °C y muy implementada en la industria de los combustibles, ya que este tipo de biogás funciona como sustituto de combustibles fósiles, lo cual ha incrementado la adaptación de sistemas utilizados con carbón mineral a este producto (Ghodake et al., 2021).

Las características finales y rendimientos de los biocarbones obtenidos están relacionadas directamente con el proceso térmico seleccionado, así como con el tipo de uso de los materiales elaborados (Tomczyk et al., 2020). Además, las propiedades de los biocarbones se ven influenciadas de manera significativa por la biomasa que es utilizada para su elaboración (Ippolito et al., 2020). Por esta razón, el biocarbón se ha convertido en un material de amplio estudio y aplicación, en diversas áreas productivas de la sociedad, siendo una alternativa para alcanzar objetivos relacionados con el desarrollo sostenible, específicamente en el área ambiental y económica. (Kumar & Bhattacharya, 2020). Es así como, la utilización de biocarbones puede relacionarse con la disminución y revalorización de los residuos sólidos (ODS 11, ciudades y comunidades sostenibles y ODS 12, producción y consumo responsables), el mejoramiento de la producción agrícola (ODS 2, hambre cero y ODS 12), la remoción de contaminantes del agua y el suelo (ODS 6, Agua limpia y saneamiento), la disminución de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y la mitigación del cambio climático (ODS 13, acción por el clima) (Kumar & Bhattacharya, 2020). A continuación, se describe la relación de los usos del biocarbón con los objetivos de desarrollo sostenible.

Revalorización de residuos sólidos.

Las tasas de generación de residuos en América Latina se encuentran entre los 0,3-1,1 kg/cápita/día; provenientes de sectores tanto domésticos como comerciales e industriales (Abarca-Guerrero et al., 2015). Por lo tanto, una alternativa para revalorizar estos residuos y mantenerlos en las cadenas de valor consiste en la producción de biocarbón a partir de residuos agrícolas, forestales, lodos, residuos de cocina, entre otros (Kumar et al., 2016; Sarfaraz et al., 2020; Velázquez Machuca et al., 2019). La conversión de residuos orgánicos en biocarbón es una opción viable para el almacenamiento y disposición final de residuos sólidos orgánicos ricos en lignina, lo que impacta el alcance de metas relacionadas con los ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y 12 (producción y consumo responsables). Además, promueve la generación de un producto de valor agregado (Quesada-González et al., 2022), impactando de manera positiva a las personas con ingresos complementarios y a su vez, disminuyendo costos asociados con el manejo de los residuos orgánicos, contribuyendo con el alcance de las metas del ODS 1 (fin de la pobreza) (Kumar & Bhattacharya, 2020).

Mejoramiento de la producción agrícola.

La utilización de biocarbones para la producción agrícola, como enmienda para el suelo, es el uso más desarrollado a nivel mundial (Ahmed et al., 2017; Bartoli et al., 2020; Chen et al., 2019; Ding et al., 2016; Jeffery et al., 2011; Schmidt et al., 2021). Diversos estudios han demostrado el impacto en el rendimiento de producción de los cultivos, donde la adición de biocarbón de distintas fuentes mejora significativamente propiedades del suelo, como la disponibilidad de nutrientes, la retención de agua y la actividad microbiana (Ameur et al., 2018; Cely et al., 2015; Fischer et al., 2020; Hailegnaw et al., 2019; Lahori et al., 2017; Li et al., 2018; Li et al., 2020; Spokas et al., 2012). Además, el uso de fertilizantes de diversos tipos, tanto orgánicos como inorgánicos, en suelos enmendados con biocarbón, ha dado resultados prometedores como agente de soporte para procesos de liberación lenta de nutrientes, lo que conlleva un gasto menor en fertilizantes y una eficiencia mayor en el proceso de adsorción en las plantas (Gwenzi et al., 2017; Manyari & Valverde Flores, 2017).

Se ha demostrado el efecto positivo que posee el biocarbón en el suelo, aumentado el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la conductividad eléctrica (Hailegnaw et al., 2019; Zhang et al., 2012) y específicamente para suelos ácidos, disminuyendo la acidez extractable (Chintala et al., 2013). Además, el biocarbón es una fuente importante de bases y macronutrientes como potasio, calcio, magnesio y fósforo, y contribuye con el incremento de la disponibilidad de algunos otros micronutrientes para las plantas (Martínez. et al., 2017; Tomczyk et al., 2020). Como enmienda, el biocarbón ha mostrado tener un efecto en la disminución de la pérdida de nutrientes (Bartoli et al., 2020; Gwenzi et al., 2017), producto de la volatilización o lixiviación. Algunos estudios han demostrado una reducción en la producción de dióxido de nitrógeno (N₂O) en el suelo, debido a la adición de biocarbón (Mukherjee & Lal, 2013; Rogovska et al., 2011; Zhang et al., 2012), sin embargo, se ha observado que este efecto es

dependiente de la materia prima utilizada, así como la retención de iones disueltos, como el potasio, debido a la alta capacidad de intercambio catiónico y pH que puede llegar a poseer el biocarbón (Cunha et al., 2021; Hailegnaw et al., 2019; Silva et al., 2022).

La capacidad adsorbente que posee el biocarbón, promueve la productividad de los cultivos, ya que aumenta y mejora la disponibilidad de diversos nutrientes (Ding et al., 2016), debido a su elevada área superficial, presencia de microporos y capacidad de intercambio catiónico (Mukherjee & Lal, 2013; Tomczyk et al., 2020). Como enmienda agrícola, el biocarbón aumenta la retención de agua en el suelo. Estudios han demostrado que el aumento en la retención de agua contribuye a la disminución de la lixiviación de nutrientes, mejorando su disponibilidad para los cultivos (Cunha et al., 2021; Silva et al., 2022). Debido a la presencia de cargas negativas dentro de la estructura del biocarbón, cationes como el amonio (NH_4^+) (Li et al., 2018), el calcio, magnesio y potasio, son retenidos y liberados de una manera más controlada en el suelo (Kumar & Bhattacharya, 2020). Los cambios en la porosidad del suelo al aplicar biocarbón influyen en la mejora de la retención de agua en el suelo, especialmente en suelos arenosos, permitiendo mantener el agua disponible para las plantas por más tiempo y reduciendo los requerimientos hídricos de los cultivos (Ding et al., 2016). Estos cambios en la porosidad del suelo son producto del reacomodo de los agregados de partículas, promoviendo poros capilares en suelos arenosos, lo cual puede contribuir a la mitigación de los requerimientos hídricos durante sequías extremas (Villagra-Mendoza & Horn, 2019).

El biocarbón también impacta positivamente la actividad microbiana del suelo. A nivel general, el biocarbón favorece la biomasa fúngica y bacteriana, principalmente en suelos con una baja cantidad de nutrientes y alta área superficial específica (Li et al., 2020), contribuyendo en la mejora de la eficiencia en la fijación microbiológica de carbono en el suelo (Xu et al., 2018). También se han reportado aumentos en la diversidad y actividad microbiana en la rizosfera de cultivos como el tomate, disminuyendo las enfermedades y mejorando la producción (Jaiswal et al., 2017; Quiroz-Mojica et al., 2021). Debido a sus múltiples efectos sobre la producción agrícola y el suelo, el uso de enmiendas con biocarbón podría estar relacionado con metas de los ODS 1 (fin de la pobreza), 2 (hambre cero), 3 (salud y bienestar), 8 (trabajo decente y crecimiento económico), 12 (producción y consumo sostenible), 13 (acción por el clima) y 15 (vida de ecosistemas terrestres) (ONU, 2018).

Remoción de contaminantes del agua y el suelo.

El biocarbón ha sido utilizado como una alternativa para el control y remediación ambiental a nivel mundial, en especial con la contaminación del agua, un problema que actualmente es vital para la población humana (Bartoli et al., 2020). Se ha utilizado en diferentes sistemas de tratamiento, debido a su capacidad de remoción, por medio del mecanismo de absorción, de metales pesados, como arsénico (Alchouron et al., 2021; Niazi et al., 2018), cadmio, cobre, cromo, níquel, zinc, plomo, entre otros (Kamali et al., 2021; Puga et al., 2015; Reddy et al., 2014; Zhang et al., 2019), hasta algunas moléculas complejas,

provenientes de la industria farmacéutica, como el paracetamol (Bursztyn Fuentes et al., 2020) o colorantes de diversos tipos, las cuales se son removidas por medio de mecanismos de absorción hidrofóbica o interacciones electrostáticas (Gallego Ramírez & Rubio Clemente, 2022; Inyang & Dickenson, 2015). Importante mencionar el efecto positivo que tiene el biocarbón sobre la remoción de plaguicidas, como las triazinas, el Imidacloprid®, Glifosato®, pimetrozina, Paraquat®, entre otros (Melo & Naval, 2023). Mojiri et al. (2020) mencionan una remoción cercana al 100 % en distintos grupos de estos compuestos, en matrices acuosas.

Por las características del biocarbón, como son la alta área superficial específica y capacidad de intercambio catiónico, debido a la presencia de grupos alifáticos dentro de la estructura que los forma, es que se posicionan como un material promisorio en el tratamiento de aguas (Das & Sarmah, 2015), siendo importante para la interacción con compuestos orgánicos de diversos tipos, debido a las fuerzas intermoleculares que se generan, de tipo dipolo-dipolo, puente de hidrógeno o dispersiones de London (Kamali et al., 2021). Esto último también los hace útiles como agentes de remoción en el suelo, evitando de antemano que sustancias nocivas contaminen los ambientes acuáticos, debido a procesos de lixiviación (Das & Sarmah, 2015), sin embargo, muchos de los procesos relacionados con la remoción de nutrientes son dependientes del pH, siendo más eficaces bajo condiciones neutras o ácidas (Bartoli et al., 2020). La combinación de biocarbón con otros componentes, también ha demostrado ser efectiva en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Narayanan et al., 2021), como las aflatoxinas (Pérez-Gómez et al., 2022) o el paracetamol (Bursztyn Fuentes et al., 2020). El tratamiento de aguas con biocarbón se puede relacionar con los ODS 3 (salud y bienestar), 6 (agua limpia y saneamiento), 11 (ciudades y comunidades sostenibles), 13 (acción por el clima), 14 (vida submarina). En el caso de lograr la implementación a escala industrial, también se podrían abarcar metas relacionadas con los objetivos 9 (industria, innovación e infraestructura) y 12 (producción y consumos responsables) (ONU, 2018).

Disminución de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y mitigación del cambio climático.

Los gases que generan un mayor impacto en el efecto invernadero y el cambio climático del planeta son el metano, el dióxido de carbono y los óxidos nitrosos, los cuales en su mayoría son producidos por actividades antropogénicas como la agricultura y la ganadería (Mukherjee & Lal, 2013). El uso de biocarbones en sistemas agrícolas presenta un alto potencial de mitigación de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). El biocarbón tiene un impacto significativamente positivo en la reducción de la generación de estos gases, iniciando con el hecho de que al producir biocarbón se disminuye la cantidad de residuos sólidos y las emisiones que produce la quema tradicional de los mismos (Smith et al., 2019), esto incluye procesos donde el biocarbón no es el producto final a obtener, como en la gasificación, pero debido a sus características fisicoquímicas es propicio para el secuestro de carbono (Burbano Salas, 2019; Quesada Kimzey, 2012; Preston, 2013). En el proceso de producción de biocarbón, la retención del carbono fijado

por el material biomásico suele ser mayor y de más lenta liberación que en otros tratamientos, por lo cual el balance global genera una disminución de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (Gross et al., 2022; Lehmann & Joseph, 2012). Con miras a disminuir la cantidad de emisiones de GEI, el biocarbón surge como una alternativa tecnológica importante para lograr este objetivo (Fawzy et al., 2021). Mediante técnicas de producción del biocarbón con baja cantidad de emisiones, como la de cortina de fuego o Kon-Tiki, es posible reducir el impacto ambiental y generar un producto aprovechable para las comunidades (Cornelissen et al., 2016).

Por ejemplo, la utilización de biocarbones en la producción de arroz, contribuye con una disminución en el uso de fertilizantes, y de manera directa, a disminuir la cantidad de metano que se genera, todo esto sin alterar el rendimiento de producción, (Dong et al., 2021) retarda la volatilización del amonio, fijándolo dentro de la estructura interna del biocarbón (Li et al., 2018; Smith et al., 2019). Existen estudios que indican que el uso de biocarbón y la disminución de dióxido de carbono atmosférico a corto plazo, es muy baja o prácticamente nula (Dong et al., 2021; Rogovska et al., 2011; Zhang et al., 2012).

Sin embargo, la captación y fijación de carbono, a partir de los biocarbones, reduce su reingreso a la atmósfera en períodos considerables de tiempo, debido a lo que se conoce como secuestro de carbono, disminuyendo el impacto general de las emisiones de dióxido de carbono (Burbano Salas, 2019; Lorenz & Lal, 2014; Preston, 2013). El proceso de transformación de las biomásas para la obtención del biocarbón contribuye de manera de lograr los objetivos tomados en los acuerdos de París, con respecto al cambio climático (Pariona-Palomino et al., 2020). Con base en lo anterior, es posible relacionar la producción y utilización del biocarbón con metas de los ODS 13 (acción por el clima) y 15 (vida de ecosistemas terrestres).

Metodología

Se realizó una búsqueda sistemática de información, similar a la implementada por Arias et al. (2023), según el diagrama mostrado en la Figura 1. Se consultaron las bases de datos Scielo, Latindex y Dialnet, así como la red Research Gate. Se restringió la búsqueda a investigaciones realizadas en América Latina y con fecha anterior a enero del año 2024. Los criterios iniciales utilizados fueron las palabras clave: Biocarbón, Producción, Ambiente, tanto en español como su traducción al inglés. Se utilizaron solo artículos científicos, omitiendo las revisiones bibliográficas, así como documentos donde no se indicará el tipo de carbón utilizado. Los documentos seleccionados fueron se clasificaron por país, año, y área de estudio (Agrícola, Ambiental), revisados de manera profunda, donde se identificó la relación entre los resultados obtenidos y los ODS.



Figura 1. Diagrama de Flujo de la revisión sistemática utilizada en la investigación.

Resultados

Biocarbón en América Latina.

A partir de la revisión de 93 artículos científicos indexados, como se observa en la Figura 2, se indica que la evolución de la investigación en biocarbón, se ha realizado mayoritariamente en América del Sur, principalmente en Brasil. En Centroamérica, la investigación en biocarbón ha estado liderada en los últimos tres años por México y Costa Rica.

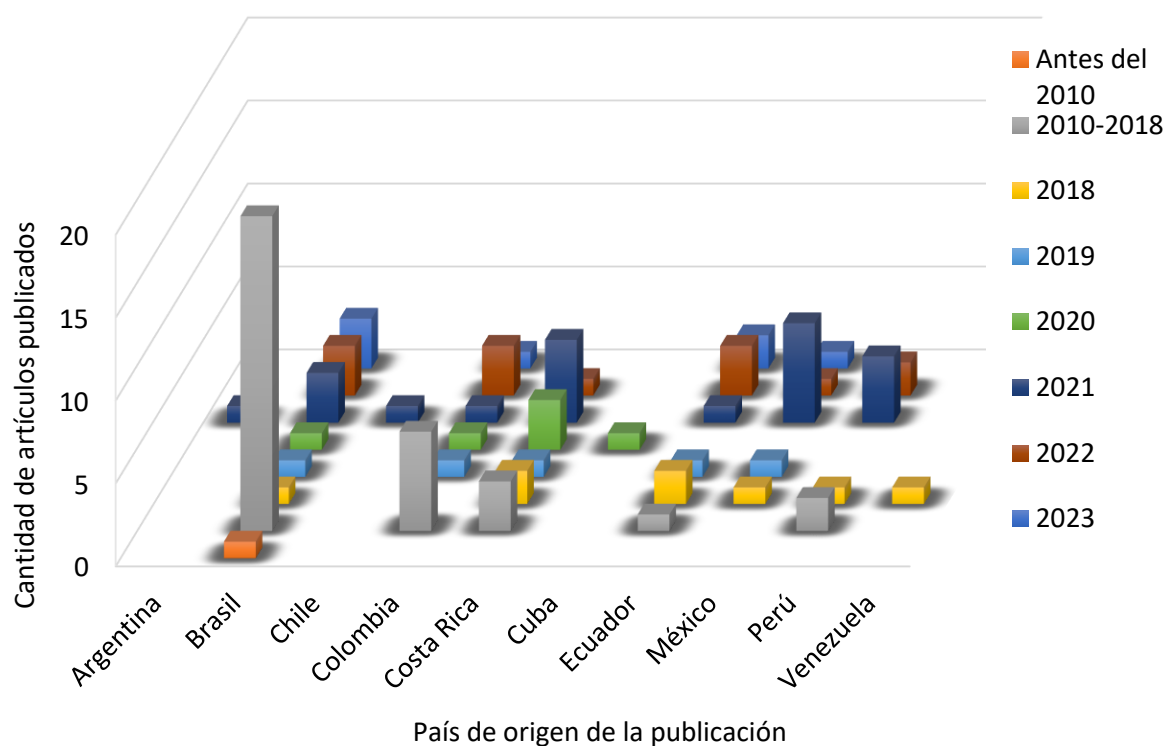


Figura 2. Investigaciones relacionadas con la producción y utilización del biocarbón en América Latina durante el periodo del 2010 al 2023, obtenido de distintas bases de datos consultadas entre 2022 y 2023.

La mayoría de la investigación orientadas hacia la agricultura, ya que según datos de Banco Mundial (2020), entre el 5 y 18 % del Producto Interno Bruto (PIB) de los países de América Latina proviene de esta actividad. El impacto de esta investigación ha sido importante a nivel ambiental, principalmente en el suelo, generando información para disminuir el efecto de problemáticas como sequía y salinización, pérdida de carbono orgánico, acidificación, entre otros (Food and Agriculture Organization and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015), lo cual ha fomentado la búsqueda de alternativas para mitigar el efecto de la actividad agrícola sobre los ecosistemas en general, sin disminuir la producción agropecuaria.

Esto se ve reflejado en las investigaciones realizadas, las cuales se han enfocado en la producción de biocarbón para uso agropecuario, como enmienda para suelo y mejora de la fertilidad (Concilco Alberto et al., 2018; Cunha et al., 2021; Gutiérrez et al., 2022; Leveau et al., 2021; Marín Armijos et al., 2018; Martínez C. et al., 2017; Manyari & Valverde Flores, 2017; Miranda et al., 2017; Mondragón-Sánchez et al., 2021; Orozco Gutiérrez et al., 2021; Pérez-Cabrera et al., 2021; Reyes Moreno et al., 2019; Reyes-

Moreno et al., 2020; Silva et al., 2022), retención de agua (Antônio Tadeu Lucas et al., 2017; Fischer et al., 2020), remoción de metales pesados (Bravo Medina et al., 2019; Figueredo et al., 2017; Gómez, 2003; Puga et al., 2015; Santos de Assis et al., 2021, Dias et al., 2022), o como sustitutos de combustibles fósiles (Assureira & Assureira, 2022; Heredia Salgado et al., 2021; Salgado et al., 2018) o aditivos en la generación de biogás (Díaz Vento et al., 2022).

La utilización de materiales residuales de otros procesos, como lodos activados (Monteiro et al., 2020; Reyes Moreno et al., 2019; Reyes-Moreno et al., 2020) o residuos de producción agrícola (Gonzaga et al., 2021; Herrera et al., 2018; Marín Armijos et al., 2018; Pérez-Cabrera et al., 2021, Quesada-González et al., 2022; Quesada Kimzey, 2012), plantas nativas de la zona (Cisneros et al., 2018) en la elaboración de biocarbones, hace posible que pueden ser reincorporados como enmienda, reduciendo costos de producción y un aumento de producción, tanto a nivel de cultivos para consumo, pastos (Lozano Reátegui et al., 2021), como de productos forestales (Reyes Moreno et al., 2019). Al lograr incorporarlos dentro de la cadena productiva, es posible iniciar un proceso de economía circular, donde se mejora la calidad de vida de las comunidades, generando formas alternativas de ingresos (Heredia Salgado et al., 2021; Milian-Luperón et al., 2020).

Escalar la producción del biocarbón es fundamental, ya que es posible implementar su uso a niveles industriales, con miras a generar productos para utilizar en los hogares o industrias (Alchouron et al., 2021; Assureira & Assureira, 2022). Desde las perspectiva energética, ya existen datos que indican una disminución de costos a nivel de escala piloto, con respecto a escala experimental, para la elaboración de biocarbón a partir de residuos de palma aceitera (Quiroz-Mojica et al., 2022). A nivel latinoamericano, la mayor información sobre el biocarbón se ha divulgado a escala de laboratorio, no obstante, es necesario invertir en el desarrollo de técnicas que puedan ser implementadas de manera sencilla, por personas ligadas al sector en donde sea aprovechado el material carbonizado y que se adapten a los criterios de sostenibilidad en todos sus aspectos (Nsamba et al., 2015).

Actualidad en Costa Rica.

Costa Rica ha tenido una participación activa creciente en la cantidad de estudios sobre la producción y utilización del biocarbón, donde destaca el uso de biocarbón como agente de retención de agua en diferentes tipos de suelo y bajo distintas condiciones climáticas (Fischer et al., 2020; Jin et al., 2021; Villagra-Mendoza et al., 2021; Villagra-Mendoza & Horn, 2018a; Villagra-Mendoza & Horn, 2018b; Villagra-Mendoza & Horn, 2019), así como enmienda agrícola para la remoción de algunos herbicidas como el Diurón[®] y el Bromacil[®] (Chin-Pampillo et al., 2021) y para cultivos forestales (Rodríguez Solís, et al., 2021). En el proceso de elaboración del biocarbón se han utilizado residuos con un impacto importante, en la gestión de desechos, a nivel nacional, como lo son los residuos a partir de la producción de piña, café, bambú y palma aceitera (Chin-Pampillo et al., 2020; Quesada Kimzey, 2012) distintos tipos de maderas (Balaguer-Benlliure et al., 2021; Pérez-Salas et al., 2013) e implementando técnicas de bajo

costo, que puedan ser de más fácil acceso en zonas rurales y de escasos recursos (Masís-Meléndez et al., 2020), teniendo en cuenta que en nuestro país el 20,7 % se encuentran en un hogar pobre, la tecnología podría ser utilizada en mayor cantidad de hogares, en distintas zonas. (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2020; Ministerio de Planificación; 2022). Los resultados de estas investigaciones están sumamente relacionados con metas de los ODS, como se observa en la Figura 3.

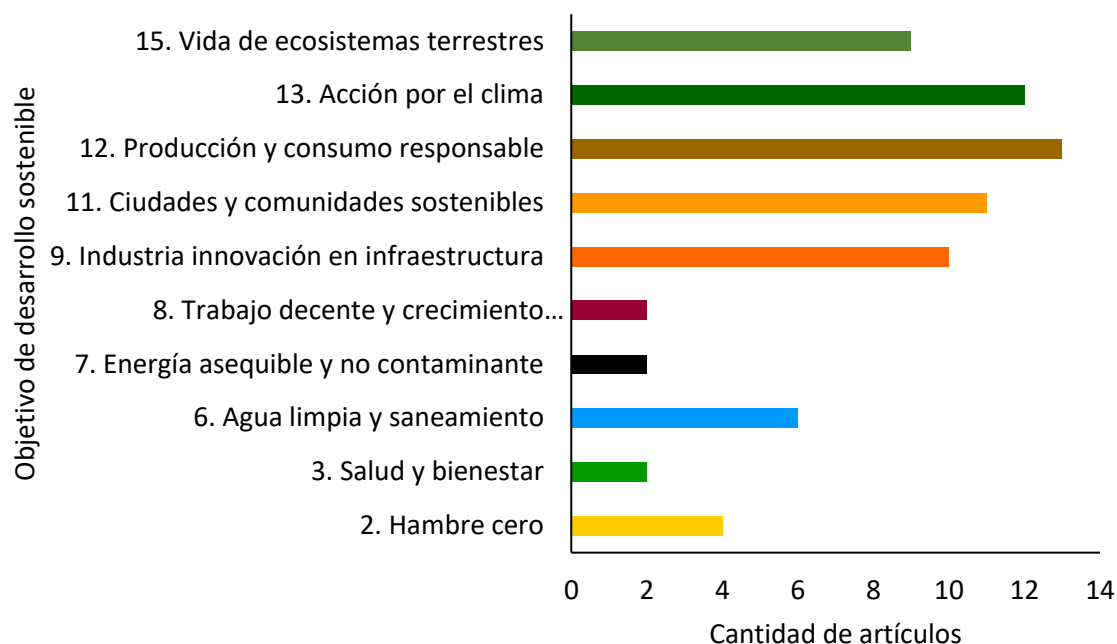


Figura 3. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) asociados con las investigaciones relacionadas con biocarbón en Costa Rica, en el período entre 2010 y 2023, de diferentes bases de datos consultadas entre el 2022 y 2023.

El ODS 9 se ha visto impactado por una incipiente actividad en el campo de la utilización de materiales carbonizados para procesos agroindustriales, tanto a nivel de investigaciones de laboratorio (Chin-Pampillo et al., 2020), como a escala de invernadero (Rodríguez Solís et al., 2021; Villagra-Mendoza et al., 2021) o en campos experimentales (Fischer et al., 2020; Jin et al., 2021). Esto genera un impacto directo en la meta de gastos en investigación y desarrollo (9.5.1) y número de investigadores (9.5.2); debido a la inversión realizada de las universidades y otras entidades en el área de investigación, así como en la meta 12.a, la cual menciona que fortalece la capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia sistemas de producción más sostenibles (ONU, 2018). Con respecto al ODS 11, se genera un impacto directo en la meta relacionada con la gestión de desechos municipales (11.6), debido a que la producción de biocarbón es una alternativa sostenible para la reducción de algunos tipos de residuos en una comunidad.

El ODS 12, específicamente la meta de reducción en la generación de desechos (12.5), tiene relación con el impacto del proceso de carbonización sobre materiales orgánicos domésticos o industriales, disminuyendo considerablemente el volumen de estos (ONU, 2018). En el ODS 13, se fomenta la implementación de actividades o tecnologías que impliquen la mitigación y adaptación al cambio climático y la reducción de sus efectos, donde uno de los indicadores es la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) anuales (13.2.2) (ONU, 2018). En Costa Rica, las emisiones de dióxido de carbono han ido en aumento desde el año 2000, alcanzando valores de más de 18 mil kt de CO₂ (Grupo Banco Mundial, 2022). La utilización de biocarbón abarca este apartado, debido a la capacidad de fijación de GEI que posee (Li et al., 2018), se han evaluado en algunos biocarbones (Balaguer-Benlliure et al., 2021) como fuente de energía, por lo que se podría buscar más investigación acerca de biocarbones que ayude a aumentar el impacto en el objetivo de energía asequible y no contaminante (ODS 3), como opción para disminuir el uso de combustibles fósiles en procesos industriales, así como aumentar el potencial calorífico de la biomasa, teniendo en cuenta que en la matriz eléctrica nacional, estas dos son las principales fuentes de combustible utilizadas, según la Organización Latinoamericana de Energía (2022).

Conclusiones

La utilización del biocarbón como alternativa para lograr una sostenibilidad fuerte, es posible de lograr. En Costa Rica se ha avanzado en la investigación a escala de laboratorio o artesanal, por lo que el siguiente paso es buscar la implementación a una escala mayor de producción, implementando la capacitación de técnicas a nivel de productores agrícolas, y de manera conjunta, la implementación de técnicas de producción a nivel industrial. La utilización de enmiendas de biocarbón con fertilizantes puede llegar a disminuir la volatilización y mejorar la disponibilidad de nutrientes, por lo que el gasto y consumo de estos sería más eficiente, y generaría menores pérdidas por lixiviación, disminuyendo el impacto en fuentes de agua. Es necesario estudiar con mayor profundidad el efecto del biocarbón sobre los organismos microbiológicos del suelo y su relación con el efecto sobre la fijación de carbono y la producción agrícola, tanto a nivel de rendimientos como de impacto de los ecosistemas.

Es posible ver el impacto del uso de biocarbón en Costa Rica sobre los ODS, ya que este material ayuda a la reducción de residuos sólidos, así alternativa para el control de contaminantes en diversas matrices, lo cual está relacionado con varias de las acciones indicadas por la ONU. Asimismo, quedan aún áreas donde el uso de biocarbones no ha sido estudiado a profundidad en el país, con un potencial importante para mejorar en la consecución de metas relacionadas con los ODS. A nivel global, es fundamental la búsqueda de procesos que fomenten la implementación de medidas sostenibles, en todos los aspectos. Costa Rica y los demás países de América Latina no son la excepción, y debido a que mucho de su producción está relacionada con la agricultura, el uso del biocarbón puede convertirse en una alternativa

importante para la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible, sin dejar de lado los demás aspectos relacionados con sostenibilidad.

Literatura citada

- Abarca-Guerrero, L., Maas, G., & Hogland, W. (2015). Desafíos en la gestión de residuos sólidos para las ciudades de países en desarrollo. *Revista Tecnología En Marcha*, 28(2), 141. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i2.2340>
- Ahmed, A. S. F., Vanga, S., & Raghavan, V. (2017). Global Bibliometric Analysis of the Research in Biochar. *Journal of Agricultural & Food Information*, 19(3), 228–236. <https://doi.org/10.1080/10496505.2017.1403328>
- Alchouron, J., Navarathna, C., Rodrigo, P. M., Snyder, A., Chludil, H. D., Vega, A. S., Bosi, G., Perez, F., Mohan, D., Pittman Jr., C. U., & Mlsna, T. E. (2021). Household arsenic contaminated water treatment employing iron oxide/bamboo biochar composite: An approach to technology transfer. *Journal of Colloid and Interface Science*, 587, 767–779. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.11.036>
- Ameur, D., Zehetner, F., Johnen, S., Jöchlinger, L., Pardeller, G., Wimmer, B., Rosner, F., Faber, F., Dersch, G., Zechmeister-Boltenstern, S., Mentler, A., Soja, G., & Keiblinger, K. M. (2018). Activated biochar alters activities of carbon and nitrogen acquiring soil enzymes. *Pedobiologia*, 69, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2018.06.001>
- Antônio Tadeu Lucas, A., Iderlane de Freitas, M., Bispo dos Santos Farias, D., & Isidória Silva Gonzaga, M. (2017). Biochar use of assessment on soil moisture. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 11(2), 1310–1314. <https://doi.org/10.7127/rbai.v11n200611>
- Arias, C. M., da Silva, L. F., Soares, M. R., & Forti, V. A. (2023). A bibliometric analysis on the agricultural use of biochar in Brazil from 2003 to 2021: research status and promising raw materials. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38(e19), 1–11. <https://doi.org/10.1017/s1742170522000412>

- Assureira, E., & Assureira, M. (2022). Transformación de las hojas de caña de azúcar en biocarbón para su uso como combustible y agente reductor en procesos de reducción directa de minerales de hierro. *Información Tecnológica*, 33(3), 51–66. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000300051>
- Balaguer-Benlliure, V., Moya, R., & Gaitán-Alvarez, J. (2021). Physical and Energy Characteristics, Compression Strength, and Chemical Modification of Charcoal Produced from Sixteen Tropical Woods in Costa Rica. *Journal of Sustainable Forestry*, 42(2), 151-169. . <https://doi.org/10.1080/10549811.2021.1978096>
- Bartoli, M., Giorcelli, M., Jagdale, P., Rovere, M., & Tagliaferro, A. (2020). A Review of Non-Soil Biochar Applications. *Materials*, 13(2), Article 261. <https://doi.org/10.3390/ma13020261>
- Bravo Medina, C. A., Alemán Pérez, R. D., Freile Almeida, J. A., Reyes Morán, H. F., Andino Inmunda, M. W., Alba Rojas, J. L., Lazo Pérez, Y., & Marino Ibarra, E. (2019). Evaluación del uso de un biocarbón sobre la absorción de cadmio del suelo y la productividad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía ecuatoriana. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 2(1), 6–15. <https://doi.org/10.46380/rias.v2i1.33>
- Brewer, C. (2012). *Biochar characterization and engineering* [Tesis de Doctorado, Universidad de Iowa State]. <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3291&context=etd>
- Burbano Salas, D. (2019). Uso del Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum* L), residuo de la poda de áreas verdes para la obtención de ácido piroleñoso con fines agropecuarios. *Ciencia Digital*, 3(3.4.), 354–364. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.4..884>
- Bursztyn Fuentes, A. L., Canevesi, R. L. S., Gadonneix, P., Mathieu, S., Celzard, A., & Fierro, V. (2020). Paracetamol removal by Kon-Tiki kiln-derived biochar and activated carbons. *Industrial Crops and Products*, 155, Article 112740. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112740>

- Cely, P., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2015). Agronomic properties of biochars from different manure wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 111, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.11.014>
- Chen, W., Meng, J., Han, X., Lan, Y., & Zhang, W. (2019). Past, present, and future of biochar. *Biochar*, 1,, 75–87. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00008-3>
- Chin-Pampillo, J. S., Alfaro-Vargas, A., Rojas, R., Giacomelli, C. E., Perez-Villanueva, M., Chinchilla-Soto, C., Alcañiz, J. M., & Domene, X. (2020). Widespread tropical agrowastes as novel feedstocks for biochar production: characterization and priority environmental uses. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11, 1775–1785. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00714-0>
- Chin-Pampillo, J. S., Perez-Villanueva, M., Masis-Mora, M., Mora-Dittel, T., Carazo-Rojas, E., Alcañiz, J. M., 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, Article 145515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145515>
- Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Malo, D. D., & Julson, J. L. (2013). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(3), 393–404. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.789870>
- Cisneros, A. G., Fernandes, E. M., Rodríguez, R. M., & Lujano, J. (2018). Preparación de carbón activado a partir de residuos de torrefaccionado y de carbonizado alcalino de biomasa vegetal (*Equisetum giganteum*). *Anales*, 18(2), 139–155. <http://ares.unimet.edu.ve/academic/revista/anales18.2/documentos/pag-139.pdf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021). Construir un futuro mejor: acciones para fortalecer la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. (LC/FDS.4/3/Rev.1). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46682-construir-un-futuro-mejor-acciones-fortalecer-la-agenda-2030-desarrollo>

- Concilco Alberto, E., Moreno Reséndez, A., García Carrillo, M., Quiroga Garza, H. M., & Ángel García, O. (2018). Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera. *Revista Terra Latinoamericana*, 36(3). <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.375>
- Cornelissen, G., Pandit, N. R., Taylor, P., Pandit, B. H., Sparrevik, M., & Schmidt, H. P. (2016). Emissions and Char Quality of Flame-Curtain “Kon Tiki” Kilns for Farmer-Scale Charcoal/Biochar Production. *PLOS ONE*, 11(5), e0154617. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>
- Cunha, E. G. da, Guidinelle, R. B., Rangel, O. J. P., & Passos, R. R. (2021). Biochar and swine wastewater: Effects on soil fertility of different textures and corn nutrition. *Revista Ceres*, 68(6), 586–596. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202168060011>
- Das, O., & Sarmah, A. K. (2015). The love–hate relationship of pyrolysis biochar and water: A perspective. *Science of the Total Environment*, 512-513, 682–685. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.061>
- Dias, Y. N., Pereira, W. V. da S., Costa, M. V. da, Souza, E. S. de, Ramos, S. J., Amarante, C. B. do, Campos, W. E. O., & Fernandes, A. R. (2022). Biochar mitigates bioavailability and environmental risks of arsenic in gold mining tailings from the eastern Amazon. *Journal of Environmental Management*, 311, 114840. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114840>
- Diaz Vento, I., Ancco, M., Peña Davila, G., Ancco-Loza, R., Davila Del-Carpio, G., & Jiménez Pacheco, H. G. (2022). Efectos del biocarbón obtenido a partir de residuos agrícolas de uva en la generación de biogás. *Revista de Investigaciones Altoandinas – Journal of High Andean Research*, 24(4), 278–288. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.423>
- Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L., & Zheng, B. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>

- Dong, D., Li, J., Ying, S., Wu, J., Han, X., Teng, Y., Zhou, M., Ren, Y., & Jiang, P. (2021). Mitigation of methane emission in a rice paddy field amended with biochar-based slow-release fertilizer. *Science of the Total Environment*, 792, Article 148460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148460>
- Food and Agriculture Organization and Intergovernmental Technical Panel on Soils. (2015). *Status of the world's soil resources; Main report*. FAO. <https://www.fao.org/soils-2015/resources/fao-publications/en/>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Yang, H., Doran, J., & Rooney, D. W. (2021). Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 3023–3055. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01210-1>
- Fernandes, J. D., Chaves, L. H. G., Dantas, E. R. B., Tito, G. A., & Guerra, H. O. C. (2022). Phosphorus availability in soil incubated with biochar: Adsorption study. *Revista Caatinga*, 35(1), 206–215. <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n121rc>
- Figueredo, N. A. de, Costa, L. M. da, Melo, L. C. A., Siebeneichler, E. A., & Tronto, J. (2017). Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. *Revista Ciência Agronômica*, 48(3), 395-403. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170046>
- Fischer, B. M. C., Morillas, L., Rojas Conejo, J., Sánchez-Murillo, R., Suárez Serrano, A., Frentress, J., Cheng, C.-H., Garcia, M., Manzoni, S., Johnson, M. S., & Lyon, S. W. (2020). Investigating the impacts of biochar on water fluxes in tropical agriculture using stable isotopes. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-404>
- Gallego Ramírez, C., & Rubio Clemente, A. (2022). Remoción de colorantes en aguas procedentes de la industria textil mediante el uso de biocarbón. Afinidad. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 79(596). <https://doi.org/10.55815/401287>
- García Serrano, E. (2020). Adaptaciones al Subsistema Nacional de Evaluación de Costa Rica a partir de los ODS. *Cuadernos Del CLAEH*, 39(112). <https://doi.org/10.29192/claeh.39.2.5>

- Ghodake, G. S., Shinde, S. K., Kadam, A. A., Saratale, R. G., Saratale, G. D., Kumar, M., Palem, R. R., AL-Shwaiman, H. A., Elgorban, A. M., Syed, A., & Kim, D.-Y. (2021). Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 297, Article 126645. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126645>
- Gómez, X. (2003). Determinación del efecto del biocarbón en movilidad del mercurio en sistema suelo-planta. *The Biologist*, 15(1). <https://doi.org/10.24039/rtb2017151137>
- Gonzaga, A., Rimaycuna, J., Cruz, G. J. F., Herrera, E. L., Gómez, M. M., Solis, J. L., Cruz, J. F., & Keiski, R. L. (2021). Removal of lead present in aqueous solutions using biochar produced from corn cob. *Manglar*, 18(1), 35–43. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.005>
- Gross, C. D., Bork, E. W., Carlyle, C. N., & Chang, S. X. (2022). Biochar and its manure-based feedstock have divergent effects on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in croplands. *Science of the Total Environment*, 806, Article 151337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151337>
- Grupo Banco Mundial. (20 de julio de 2022). Indicadores del desarrollo mundial [Archivo de Excel]. Datos.bancomundial.org. <https://datos.bancomundial.org/pais/costa-rica?view=chart>
- Gutiérrez, J., Rubio-Clemente, A., & Pérez, J. F. (2022). Analysis of biochars produced from the gasification of Pinus patula pellets and chips as soil amendments. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, 24(49). <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100449>
- Gwenzi, W., Nyambishi, T. J., Chaukura, N., & Mapope, N. (2017). Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N–P–K slow-release fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(2), 405–414. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1399-7>
- Hailegnaw, N. S., Mercl, F., Pračke, K., Száková, J., & Tlustoš, P. (2019). Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 19(5), 2405–2416. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02264-z>

- Heredia Salgado, M. A., Säumel, I., Cianferoni, A., & Tarelho, L. A. C. (2021). Potential for Farmers' Cooperatives to Convert Coffee Husks into Biochar and Promote the Bioeconomy in the North Ecuadorian Amazon. *Applied Sciences*, 11(11), Article 4747. <https://doi.org/10.3390/app11114747>
- Herrera, E., Feijoo, C., Alfaro, R., Solís, J., Gómez, M., Keiski, R., & Cruz, G. (2018). Biochar based on residual biomasses and its influence over seedling emergence and growth in vivarium of *Capparis scabrida* (Sapote). *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 569–577. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.13>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). Indicadores de seguimiento ODS 2019 TOMO II. Editorial del Instituto Nacional de Estadística y Censos, ISBN 978-9930-525-47-0. <https://ods.cr/recursos/indicadores-de-seguimiento-ods-2019-tomo-ii>
- Intergovernmental Panel of Climate Change (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- Inyang, M., & Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere*, 134, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072>
- Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2(4), 421–438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>

- Jaiswal, A. K., Elad, Y., Paudel, I., Graber, E. R., Cytryn, E., & Frenkel, O. (2017). Linking the Belowground Microbial Composition, Diversity and Activity to Soilborne Disease Suppression and Growth Promotion of Tomato Amended with Biochar. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/srep44382>
- Jeffery, S., Verheijen, F., van der Velde, M., & Bastos, A. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Jin, H., Köppl, C. J., Fischer, B. M. C., Rojas-Conejo, J., Johnson, M. S., Morillas, L., Lyon, S. W., Durán-Quesada, A. M., Suárez-Serrano, A., Manzoni, S., & Garcia, M. (2021). Drone-Based Hyperspectral and Thermal Imagery for Quantifying Upland Rice Productivity and Water Use Efficiency after Biochar Application. *Remote Sensing*, 13(10), Article 1866. <https://doi.org/10.3390/rs13101866>
- Kamali, M., Appels, L., Kwon, E. E., Aminabhavi, T. M., & Dewil, R. (2021). Biochar in water and wastewater treatment – a sustainability assessment. *Chemical Engineering Journal*, 420, Article129946. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129946>
- Kumar, A., & Bhattacharya, T. (2020). Biochar: a sustainable solution. *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 6642–6680. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00970-0>
- Kumar, A., Schreiter, I. J., Wefer-Roehl, A., Tsechansky, L., Schüth, C., & Graber, E. R. (2016). Production and Utilization of Biochar From Organic Wastes for Pollutant Control on Contaminated Sites. *Environmental Materials and Waste*, 91–116. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803837-6.00005-6>
- Lahori, A. H., Guo, Z., Zhang, Z., Li, R., Mahar, A., Awasthi, M. K., Shen, F., Sial, T. A., Kumbhar, F., Wang, P., & Jiang, S. (2017). Use of biochar as an amendment for remediation of heavy metal-contaminated soils: Prospects and challenges. *Pedosphere*, 27(6), 991–1014. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(17\)60490-9](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(17)60490-9)

- Lehmann, J., & Joseph, S. (2012). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Taylor And Francis.
- Leveau, M., Dumler, S., Anaya De La Rosa, R., Alegre, J., & Ladd, B. (2021). Uso de biocarbón en el balance de nitrógeno en suelos aluviales de San Ramón / Chanchamayo / Perú. *Ecología Aplicada*, 20(2), 179–188. <https://doi.org/10.21704/rea.v20i2.1808>
- Li, S., Barreto, V., Li, R., Chen, G., & Hsieh, Y. P. (2018). Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 133, 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.04.010>
- Li, X., Wang, T., Chang, S. X., Jiang, X., & Song, Y. (2020). Biochar increases soil microbial biomass but has variable effects on microbial diversity: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 749, Article 141593. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141593>
- Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 651–670. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400058>
- Lozano Reátegui, R. M., Alegre Orihuela, J. C., Velazco Castro, E. V., Mendoza Carlos, M. M., & Nieto Iturri, W. G. (2021). Biocarbón de cáscaras de semilla de palma aceitera enriquecido en biol de estiércol para mejorar suelos sobre pastoreados. *Llamkasun*, 2(2), 15–37. <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v2i2.39>
- Manyari, F., & Valverde Flores, J. (2017). Use of vinasse and biocarbon to the remediation of saline – sodium soils in the district of Tambogrande, Piura. *Journal of Energy & Environmental Sciences*, 1(1), 23–33. <https://doi.org/10.32829/eesj.v1i1.28>
- Marín Armijos, J., García Batista, R. M., & Barrezueta Unda, S. (2018). Elaboración de biocarbón obtenido a partir de la cáscara del cacao y raquis del banano. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(3), 75–81. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/221>

- Martínez C., M. J., España A., J. C., & Diaz V., J. D. J. (2017). Effect of Eucalyptus globulus biochar addition on the availability of phosphorus in acidic soil. *Agronomía Colombiana*, 35(1), 75–81. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n1.58671>
- Masís-Meléndez, F., Segura-Chavarría, D., García-González, C. A., Quesada-Kimsey, J., & Villagra-Mendoza, K. (2020). Variability of Physical and Chemical Properties of TLUD Stove Derived Biochars. *Applied Sciences*, 10(2), Article 507. <https://doi.org/10.3390/app10020507>
- Melo, R. L. de, & Naval, L. P. (2023). Low-cost sorbent for removing glyphosate from aqueous solutions for non-potable reuse. *Revista Ambiente & Água*, 18, Article e2875. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2875>
- Milian-Luperón, L., Hernández-Rodríguez, M., Falcón-Hernández, J., & Otero-Calvis, A. (2020). Obtaining bioproducts by slow pyrolysis of coffee and cocoa husks as suitable candidates for being used as soil amendment and source of energy. *Revista Colombiana de Química*, 49(2), 23–29. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v49n2.83231>
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (2022). ODS en Costa Rica | Objetivos de Desarrollo Sostenible. Objetivos de Desarrollo Sostenible En Costa Rica. <https://ods.cr/ods-en-costa-rica>
- Miranda, N. D. O., Pimenta, A. S., Silva, G. G. C. D., Oliveira, E. M. M., & Carvalho, M. A. B. D. (2017). Biochar as soil conditioner in the succession of upland rice and cowpea fertilized with nitrogen. *Revista Caatinga*, 30(2), 313–323. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n206rc>
- Mojiri, A., Zhou, J. L., Robinson, B., Ohashi, A., Ozaki, N., Kindaichi, T., Farraji, H., & Vakili, M. (2020). Pesticides in aquatic environments and their removal by adsorption methods. *Chemosphere*, 253, Article 126646. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126646>
- Mondragón-Sánchez, A., Medina-Orozco, L. E., Sánchez-Duque, A., & Núñez-Oregel, V. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz en Michoacán, México. *Revista Tierra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.896>

- Monteiro, A. B., Pereira, I. dos S., Bamberg, A. L., Stöcker, C. M., & Timm, L. C. (2020). Substrates for seedlings with sewage sludge and biochar. *Revista Ceres*, 67(6), 491–500. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202067060009>
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy*, 3(2), 313–339. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>
- Narayanan, M., Kandasamy, G., Kandasamy, S., Natarajan, D., Devarayan, K., Alsehli, M., Elfakhany, A., & Pugazhendhi, A. (2021). Water hyacinth biochar and *Aspergillus niger* biomass amalgamation potential in removal of pollutants from polluted lake water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), Article 105574. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105574>
- Niazi, N. K., Bibi, I., Shahid, M., Ok, Y. S., Burton, E. D., Wang, H., Shaheen, S. M., Rinklebe, J., & Lüttge, A. (2018). Arsenic removal by perilla leaf biochar in aqueous solutions and groundwater: An integrated spectroscopic and microscopic examination. *Environmental Pollution*, 232, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.051>
- Nsamba, H. K., Hale, S. E., Cornelissen, G., & Bachmann, R. T. (2015). Sustainable Technologies for Small-Scale Biochar Production—A Review. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 5(1), 10–31. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2015.51002>
- Organización de las Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe Objetivos, metas e indicadores mundiales. Naciones Unidas. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40155-la-agenda-2030-objetivos-desarrollo-sostenible-oportunidad-america-latina-caribe>
- Organización Latinoamericana de Energía (2022). Panorama energético de América Latina y el Caribe 2022. In Organización Latinoamericana de Energía (pp. 133–140). Organización Latinoamericana de Energía. <https://www.olade.org/publicaciones/panorama-energetico-de-america-latina-y-el-caribe-2021-2/>

- Orozco Gutiérrez, G., Medina Telez, L., Elvira Espinosa, A., & Cervantes Preciado, J. F. (2021). Biocarbón de bambú como mejorador de la fertilidad del suelo en caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.780>
- Páez Vieyra, J. C. (2019). Agenda común sobre desarrollo sostenible en América Latina. *InterNaciones*, (18). <https://doi.org/10.32870/in.v0i18.7149>
- Pariona-Palomino, J., Matos Ormeño, W., & Huilca Huanaco, E. (2020). Biochar como tecnología de emisión negativa frente al cambio climático. *South Sustainability*, 1(2). <https://doi.org/10.21142/ss-0102-2020-014>
- Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejacal, I., Salcedo-Pérez, E., Guillén-Sánchez, D., Balois-Morales, R., López-Martínez, V., & Castro-Brindis, R. (2021). Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos. *Revista Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.936>
- Pérez-Gómez, E. O., García-Rosales, G., Longoria-Gándara, L. C., & Gómez-Vilchis, J. C. (2022). Obtention of biochar-Ca nanoparticles using Citrus rasilien A morphological, surface and study remotion of Aflatoxin AFB1. *Journal of Hazardous Materials*, 424, Article 127339. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127339>
- Pérez-Salas, R. A., Tapia Fernández, A. C., 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*, 14(27). <https://doi.org/10.15517/isucr.v14i27.10408>
- Preston, T. R. (2013). El papel del biocarbono en la sostenibilidad y competitividad de sistemas agropecuarios. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 304–312. <https://www.redalyc.org/pdf/2950/295060031011.pdf>
- Puga, A. P., Abreu, C. A., Melo, L. C. A., & Beesley, L. (2015). Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. *Journal of Environmental Management*, 159, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.036>

- Quesada Kimzey, J. (2012). La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. *Revista Tecnología En Marcha*, 25(5), 14. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.465>
- Quesada-González, O., Cantos-Macías, M. A., Duharte-Rodríguez, W. L., Cascaret-Carmenaty, D. A., & Rodríguez-Matos, J. (2022). Biocarbones ecuatorianos con potencialidades energéticas. *Revista Cubana de Química*, 34(2), 285–302. <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq>. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212022000200285&lng=pt&tIng=es
- Quiroz-Mojica, L. J., Daza-Mendoza, M. M., Díaz-Muegue, L. C., Melo-Rios, A. E., & Peñuela-Mesa, G. A. (2021). Efecto de biochar, micorrizas arbusculares y *Guazuma ulmifolia*, en la rehabilitación de suelos mineros. *Revista Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.709>
- Quiroz-Mojica, L. J., Peñuela-Mesa, G. A., Diaz-Muegue, L. C., Martinez-Smit, C., & Bastidas-Barranco, M. J. (2022). Exergo-economic study of the process for obtaining biochar derived from oil palm kernel shell on an experimental and pilot scale. *DYNA*, 89(223), 133–140. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n223.99359>
- Reddy, K. R., Xie, T., & Dastgheibi, S. (2014). Evaluation of Biochar as a Potential Filter Media for the Removal of Mixed Contaminants from Urban Storm Water Runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 140(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000872](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000872)
- Reyes Moreno, G., Darghan Contreras, A. E., & Ramírez Lesmes, D. A. (2019). Design of a surface response model to determine the optimal value for wood volume in *Acacia mangium* Willd, by applying different doses of biochar to the soil. *DYNA*, 86(211), 26–31. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.78331>
- Reyes-Moreno, G., Cuervo-Andrade, J. L., Darghan-Contreras, A. E., & Cárdenas-Pardo, N. J. (2020). Impact of dry sludges and sludge biochar on height and dry matter of *Solanum lycopersicum* L. *Agronomía Colombiana*, 38(2), 242–252. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n2.81842>

- Rodríguez Solís, A., Badilla Valverde, Y., & Moya, R. (2021). Agronomic Effects of Tectona grandis Biochar from Wood Residues on the Growth of Young Cedrela odorata Plants in a Nursery. *Agronomy*, 11(10), Article 2079. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102079>
- Rogovska, N., Laird, D., Cruse, R., Fleming, P., Parkin, T., & Meek, D. (2011). Impact of Biochar on Manure Carbon Stabilization and Greenhouse Gas Emissions. *Soil Science Society of America Journal*, 75(3), 871-879. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0270>
- Salgado, M. A. H., Tarelho, L. A. C., Matos, A., Robaina, M., Narváez, R., & Peralta, M. E. (2018). Thermoeconomic analysis of integrated production of biochar and process heat from quinoa and lupin residual biomass. *Energy Policy*, 114, 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.014>
- Santos de Assis, W., Caldeira do Nascimento, E., D'Acunha, B., dos Santos Weber, O. L., Freire Gaspar Dore, E., & Guimarães Couto, E. (2021). Effects of swine manure biochar on sorption equilibrium of cadmium and zinc in sandy soils. *Agronomía Colombiana*, 39(1), 37–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n1.90918>
- Sarfaraz, Q., Silva, L. S. da, Drescher, G. L., Zafar, M., Severo, F. F., Kokkonen, A., Dal Molin, G., Shafi, M. I., Shafique, Q., & Solaiman, Z. M. (2020). Characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57987-8>
- Schmidt, H. P., Bucheli, T., Kammann, C., Glaser, B., Abiven, S., Leifeld, J., Soja, G., & Hagemann, N. (2022). Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. In <https://www.european-biochar.org> (p. 10). European Biochar Foundation. https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_1.pdf
- Schmidt, H., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T. D., Sánchez Monedero, M. A., & Cayuela, M. L. (2021). Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB-Bioenergy*, 13(11), 1708–1730. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12889>

- Silva, M. S. A., Colen, F., Sampaio, R. A., Azevedo, A. M., Basílio, J. J. N., Cota, C. G., & Fernandes, L. A. (2022). Biochar from Caryocar rasiliense as a soil conditioner for common bean plants. *Ciência Rural*, 52(7). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200871>
- Smith, P., Adams, J., Beerling, D. J., Beringer, T., Calvin, K. V., Fuss, S., Griscom, B., Hagemann, N., Kammann, C., Kraxner, F., Minx, J. C., Popp, A., Renforth, P., Vicente Vicente, J. L., & Keesstra, S. (2019). Land-management options for greenhouse gas removal and their impacts on ecosystem services and the sustainable development goals. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 255–286. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033129>
- Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A. A., Lima, I. M., Lamb, M. C., McAloon, A. J., Lentz, R. D., & Nichols, K. A. (2012). Biochar: A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19, 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Velázquez Machuca, M. A., Equihua Soriano, J. R., Venegas González, J., Montañez Soto, J. L., Pimentel Equihua, J. L., & Muñoz Navia, M. (2019). Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. *Revista Terra Latinoamericana*, 37(3), 243-251. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.409>
- Villagra-Mendoza, K., & Horn, R. (2018a). Effect of biochar on the unsaturated hydraulic conductivity of two amended soils. *International Agrophysics*, 32(3), 373–378. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0025>
- Villagra-Mendoza, K., & Horn, R. (2018b). Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma*, 326, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.021>

- Villagra-Mendoza, K., & Horn, R. (2019). Changes in Water Infiltration after Simulated Wetting and Drying Periods in two Biochar Amendments. *Soil Systems*, 3(4), Article 63. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3040063>
- Villagra-Mendoza, K., Masís-Meléndez, F., Quesada-Kimsey, J., García-González, C. A., & Horn, R. (2021). Physicochemical Changes in Loam Soils Amended with Bamboo Biochar and Their Influence in Tomato Production Yield. *Agronomy*, 11(10), Article 2052. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102052>
- Xu, Y., Seshadri, B., Sarkar, B., Wang, H., Rumpel, C., Sparks, D., Farrell, M., Hall, T., Yang, X., & Bolan, N. (2018). Biochar modulates heavy metal toxicity and improves microbial carbon use efficiency in soil. *Science of the Total Environment*, 621, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.214>
- Zhang, A., Bian, R., Pan, G., Cui, L., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., Zheng, J., Zhang, X., Han, X., & Yu, X. (2012). Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*, 127, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.020>
- Zhang, J., Shao, J., Jin, Q., Li, Z., Zhang, X., Chen, Y., Zhang, S., & Chen, H. (2019). Sludge-based biochar activation to enhance Pb(II) adsorption. *Fuel*, 252, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.096>