Agronomía Mesoamericana

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Revisión bibliográfica

Volumen 36: Artículo r68t4z48, 2025
e-ISSN 2215-3608, https://doi.org/10.15517/r68t4z48

Potencial de obtención de materiales carbonosos a partir de bambú: caso de Costa Rica*

Potential for obtaining carbonaceous materials from bamboo: Costa Rica case

Esteban Gamboa-Gamboa[1], *Rodolfo Antonio Hernández-Chaverri*[1]

* Recibido: 23 de octubre, 2024. Aceptado: 4 de marzo, 2025. Este trabajo formó parte del proyecto PRY-0050-2021, "Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica del cultivo de coyol (*Acrocomia* spp.) y de bambú (*Dendrocalamus* spp.) bajo un modelo de biorrefinería con materia prima proveniente de Abangares-Guanacaste y Matina-Limón, Costa Rica".

[1] Universidad Estatal a Distancia, Laboratorio de Ingeniería en BioProcesos. San José, Costa Rica. egamboag@uned.ac.cr (https://orcid.org/0009-0004-2172-3977); rohernandez@uned.ac.cr (autor para correspondencia; https://orcid.org/0000-0002-1841-1954).

Resumen

Introducción. El bambú como recurso agroforestal en Costa Rica incluye especies introducidas y nativas utilizadas en la fabricación de muebles, lo que genera residuos con potencial para obtener materiales carbonosos. **Objetivo.** Analizar tecnologías y condiciones para la producción de materiales carbonosos a partir del bambú y su aplicación en un modelo de economía y bioeconomía circular dentro del contexto del cultivo en Costa Rica. **Desarrollo.** Los principales procesos son la pirólisis (lenta, media y rápida) y la torrefacción, que se diferencian por la temperatura aplicada: la torrefacción ocurre entre 200 °C y 300 °C, mientras que la pirólisis entre 350 °C y 700 °C. Estas condiciones pueden variar según la atmósfera utilizada (CO_2, N_2, vapor de agua, aire u oxígeno mínimo). Entre los materiales que se pueden obtener destacan el carbón activado y el biocarbón, con investigaciones recientes enfocadas en aplicaciones en electrónica y tratamiento de aguas, además de mejorar su aprovechamiento como combustible. Sin embargo, en muchos estudios no se evidencia la especie de bambú empleada ni una estandarización de los procesos y metodologías de producción, dado que dependen de la composición fisicoquímica y la región de cultivo. En el país, faltan trabajos recientes sobre productividad y áreas de cultivo que permitan estimar la cantidad de materiales carbonosos que podrían generarse. **Conclusiones.** Existe una oportunidad de investigación en el cultivo de bambú en Costa Rica, que abarque aspectos agronómicos y la producción de materiales carbonosos con aplicaciones de alto valor agregado, y que promueva un modelo de economía y bioeconomía circular.

Palabras clave: biocarbón, carbón activado, grafito, torrefacción, pirólisis.

Abstract

Introduction. Bamboo as an agroforestry resource in Costa Rica includes introduced and native species, used in furniture manufacturing, which generates waste with potential to obtain carbonaceous materials. **Objective.** To analyze technologies and conditions for producing carbonaceous materials from bamboo and their application in a circular economy and bioeconomy model within the context of bamboo cultivation in Costa Rica. **Development.** The main processes are pyrolysis (slow, medium, and fast) and torrefaction, differentiated by the temperature

© 2025 Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

applied: torrefaction occurs between 200 °C and 300 °C, while pyrolysis takes place between 350 °C and 700 °C. These conditions may vary according to the atmosphere used (CO_2, N_2, steam, air or minimum oxygen). Among the materials that can be obtained, activated carbon and biochar stand out, with recent research focused on applications in electronics and water treatment, as well as improving their use as fuel. However, many studies do not specify the bamboo species used or standardize the production processes and methodologies, as these depend on the physicochemical composition and region of cultivation. In the country, there is a lack of recent studies on productivity and cultivation areas to estimate the amount of carbonaceous materials that could be generated. **Conclusions.** There is an opportunity for research on bamboo cultivation in Costa Rica, covering agronomic aspects and the production of carbonaceous materials with high value-added applications, promoting a circular economy and bioeconomy model.

Keywords: Biochar, activated carbon, graphite, torrefaction, pyrolysis.

Introducción

El término "bambú" hace referencia a una subfamilia botánica: Bambusoideae, de la cual se conocen más de 1500 especies que varían en tamaño, forma, características de crecimiento y adaptabilidad climática. Sin embargo, solo unas pocas presentan relevancia en cuanto a su aprovechamiento, por lo que tanto las aplicaciones como las investigaciones existentes se concentran en esos casos (Van Dam et al., 2018). Entre los géneros más estudiados destacan *Bambusa*, *Dendrocalamus* y *Phyllostachys*, originarios de Asia e introducidos en diversas zonas geográficas, incluidas las regiones tropicales y subtropicales de América. Además, resalta *Guadua angustifolia*, una especie nativa del continente americano (Organización Internacional del Bambú y el Ratán [INBAR], 2023).

El uso del bambú es más notorio en Asia, donde ha sido cultivado y empleado desde tiempos ancestrales. No obstante, las especies con potencial de aprovechamiento no se limitan a dicha región, ya que han sido introducidas en otras latitudes, incluida Costa Rica, lo que genera un contexto de utilización variable (Deras, 2003). Las aplicaciones más comunes de las especies de estos géneros incluyen la construcción, la ebanistería y las artesanías. También se aprovechan con fines alimenticios o en usos con un mayor nivel de industrialización, como la obtención de fibras textiles y pulpa de papel (INBAR, 2023).

En el caso de la construcción, la ebanistería y la confección de artesanías, el bambú se suele emplear tanto para elementos estructurales como decorativos, dado que los culmos maduros son livianos, flexibles y duraderos. En la industria textil y papelera, su utilización se basa en las características mecánicas de las fibras presentes en los culmos (Van Dam et al., 2018). El bambú también posee aplicaciones en el campo agroindustrial, desde su uso en cercas y sombra hasta el aprovechamiento de su tasa de crecimiento y su amplia estructura radicular para el control de la erosión y la captura de carbono (Calvo & Avilés, 2003; Montiel & Murillo, 1998).

El bambú presenta una alta versatilidad en cuanto a su potencial. Sin embargo, los usos mencionados generan una cantidad importante de residuos, tanto en campo como durante su procesamiento posterior (Ding et al., 2023). En el caso particular de Costa Rica no existe una industria del bambú tan desarrollada como en la región asiática; no obstante, en aquellos sectores en los que se utiliza (construcción, ebanistería y artesanía) hay un aspecto común: la escasa valorización de los residuos.

Por ello, el aprovechamiento de los desechos de la producción e industrialización del bambú representaría una oportunidad clave en la obtención de materiales carbonosos, energía primaria, fibras, entre otros, de manera que se puedan impulsar, bajo un modelo de economía circular alrededor de esta planta, el desarrollo rural y la creación de empleo en comunidades que dependen del sector agroindustrial como fuente primordial de ingresos. Además, el desarrollo de cadenas de valor en torno a la biomasa lignocelulósica del bambú puede diversificar la economía de

las zonas de cultivo y transformación. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue analizar tecnologías y condiciones para la producción de materiales carbonosos a partir del bambú y su aplicación en un modelo de economía y bioeconomía circular dentro del contexto del cultivo en Costa Rica.

Generalidades sobre los materiales carbonosos

Los materiales carbonosos se obtienen a partir del procesamiento térmico de alguna biomasa. En los últimos años se ha extendido el uso del término "biochar" para este tipo de materiales, aunque este se suele emplear cuando al material carbonoso se le da un aprovechamiento agronómico. El biochar o biocarbón es valioso como enmienda del suelo debido a sus propiedades beneficiosas: mejora la estructura y fertilidad del suelo, aumenta la capacidad de retención de agua y promueve la actividad microbiana (Awasthi et al., 2020). Además, puede adsorber y retener nutrientes, liberándolos de forma gradual para el beneficio de las plantas. Con ello, el uso del biochar puede reducir la dependencia de los fertilizantes sintéticos y contribuir a una gestión más eficiente de los recursos (Huang et al., 2023; Qu et al., 2016).

Si se toma en cuenta el alto potencial de producción de los materiales carbonosos, estos pueden ser utilizados de manera directa, o bien tras haberles realizado modificaciones físicas o químicas que les permitan adaptar sus propiedades y características a otras aplicaciones, como podrían ser el campo de la electrónica, la depuración de agua y aire (Suresh & Bandosz, 2018), el secuestro de carbono, la fijación de CO_2, la adsorción de metales pesados, combustible, entre otros (Ahmad et al., 2022; Kaikiti et al., 2021; Khan et al., 2021; Song et al., 2022; Zhang, Sun, et al., 2022). Al obtener este tipo de materiales se logra reciclar y reutilizar residuos o subproductos biomásicos, como aquellos derivados de la producción e industrialización de maíz, trigo, soya, café, coco, entre otros (Gautam & Chaurasia, 2020; Nistratov et al., 2020).

Un aspecto abordado en investigaciones sobre la producción de materiales carbonosos es el de los productos adicionales que pueden aprovecharse en su elaboración. Al realizar procesos controlados de transformación térmica, se generan subproductos tanto gaseosos como líquidos, que pueden utilizarse en la producción de energía o en la síntesis de productos de alto valor agregado (Gautam & Chaurasia, 2020; Li et al., 2016; Li et al., 2021; Oyedun et al., 2013; Rao et al., 2023; Wu et al., 2023). La obtención de materiales carbonosos también presenta como ventaja el secuestro de carbono, ya que este elemento queda retenido de manera estable en la estructura cristalina. Lo anterior contribuye a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y metano a la atmósfera, producidas por la descomposición de los residuos en campo o rellenos sanitarios, lo que permite una disminución tanto de gases de efecto invernadero, como de otros componentes contaminantes (Zhou et al., 2014).

Aparte del uso agronómico, otro destino de los materiales carbonosos es la producción de carbón vegetal para fines energéticos. Sin embargo, esta aplicación no suele brindar ventajas considerables desde el punto de vista operativo y financiero en comparación con la utilización de la biomasa cruda (Hu et al., 2021; Khiari et al., 2019; Patel et al., 2021; Sangsuk et al., 2020; Sattasathuchana et al., 2023). Por lo tanto, el uso de biomasas alternativas con un grado bajo de industrialización, como el bambú en el caso de Costa Rica, ofrece una oportunidad para explorar el potencial de producción de materiales carbonosos y ampliar el panorama hacia aplicaciones menos convencionales que aporten un mayor valor agregado al producto final.

Uno de los materiales carbonosos más estudiados es el carbón activado. Un aspecto para considerar en su producción es el proceso de activación, mediante el cual se le otorga una porosidad significativa. El material original se somete a la acción de altas temperaturas con la posible combinación de algún agente químico, de manera que se eliminan componentes volátiles y se expande la estructura del carbón (Singh et al., 2017; Valdés-Rodríguez et al., 2022; Zoroufchi Benis et al., 2022). Al alcanzar una alta porosidad, el material resultante se convierte en un excelente adsorbente, con la posibilidad de ser utilizado en diversas aplicaciones como cosméticos, alimentos,

depuración de aire y aguas, remediación de suelos, fibras de capacitores, entre otros (Kakati et al., 2022; Nistratov et al., 2020; Suresh & Bandosz, 2018).

Además, el carbón activado presenta el potencial de ser funcionalizado, es decir, de incorporar componentes de interés en su estructura que se ajusten a aplicaciones específicas, lo cual amplía las oportunidades de uso de este material (Rengga et al., 2017; Wang et al., 2022). En cuanto a las biomasas empleadas en su elaboración, existe una gran variedad, y cada materia prima tiene el potencial de generar carbones activados con características particulares, lo que da relevancia a la investigación acerca de la activación de carbones provenientes de distintas fuentes biomásicas (Dubey et al., 2020). En el caso particular del bambú, se trata de una biomasa para la que existe gran cantidad de estudios sobre la producción de carbón activado, e incluso hay casos de fabricación a escala industrial orientados a diversos usos (Khuong et al., 2021).

Otro material que ha sido objeto de investigación es el carbón grafítico, cuya principal aplicación se encuentra en la producción de dispositivos electrónicos, baterías, entre otros (Vijayakumar et al., 2018). Para obtenerlo, se pueden seguir dos rutas: el carbón vegetal se somete a altas temperaturas (2000-3000 °C), o bien, se emplea de manera directa la biomasa cruda a temperaturas cercanas a los 1000 °C (Dubey et al., 2020; Gao et al., 2020). Ambos tratamientos provocan la formación de capas de carbono organizadas en estructuras planas, lo que confiere al carbón las propiedades del grafito, aunque cada ruta da como resultado materiales con diferentes características (Fromm et al., 2018).

Al igual que sucede con otros productos obtenidos a partir de materiales carbonosos de origen biomásico, en el caso del grafito, las materias primas estudiadas son muy variadas y afectan el patrón de grafitización, así como las aplicaciones del producto final (Soltani et al., 2021). Además, la variabilidad en el desempeño del resultado final suele evaluarse en función de la adición de algún material que aporte mejores características electroquímicas (Fromm et al., 2018). En cuanto al bambú como materia prima para la obtención de grafito, existen investigaciones orientadas primordialmente a estimar su desempeño como conductor de electricidad (Soltani et al., 2021).

Procesos térmicos para obtención de materiales carbonosos

Para la producción de materiales carbonosos, ya sea a nivel de laboratorio, en planta piloto o en aplicaciones industriales, se deben tomar en cuenta todos los pasos previos para obtener dicho material. Es importante considerar el tamaño de partícula y las implicaciones energéticas asociadas a este proceso. Algunas tecnologías realizan una disminución de tamaño antes de los procesos térmicos, mientras que en otras ocasiones la molienda se lleva a cabo después de una primera etapa de tratamiento térmico. Esto se asocia con la cristalinidad del material de partida y su composición relacionada con celulosa, hemicelulosa y lignina. Un aspecto clave es el procesamiento térmico, que permite convertir la biomasa en un material rico en carbono, eliminando buena parte de los componentes volátiles al degradar la biomasa mediante la acción del calentamiento. Existen diversos procesos o rutas para producir este material, que pueden seleccionarse según la capacidad técnica, las características esperadas del material carbonoso o la relevancia de los subproductos líquidos y gaseosos.

Un factor común en todos los procesos térmicos son los pretratamientos requeridos, entre los cuales se incluye el secado (excepto cuando el proceso se realiza en húmedo) y la reducción de tamaño. La humedad puede afectar de forma negativa la eficiencia tanto del proceso térmico como de la disminución de tamaño que se suele efectuar por molienda. La reducción de tamaño es de gran importancia, ya que posibilita que las partículas de biomasa alcancen de manera eficaz la temperatura de reacción deseada, lo que permite suponer una velocidad de reacción uniforme en toda la partícula (Dharmaraja et al., 2023; Huang et al., 2020). Un resumen de los procesos térmicos con potencial de aplicación en el bambú para la obtención de materiales carbonosos se muestra en la Figura 1.

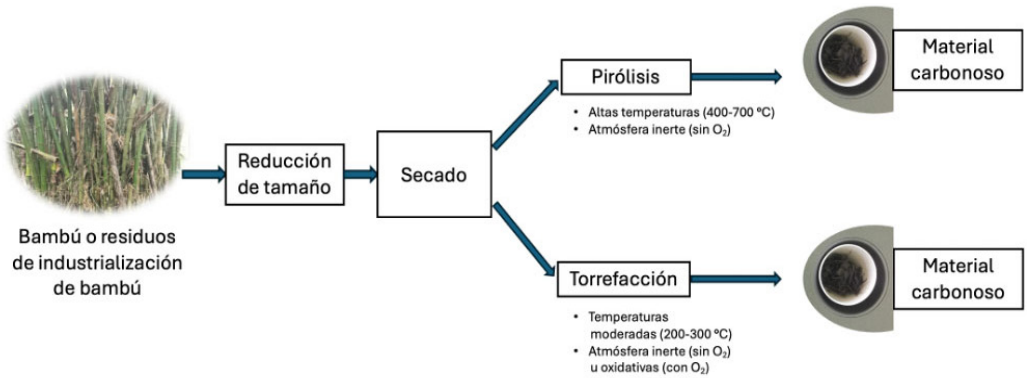

Figura 1. Resumen de la obtención de materiales carbonosos mediante los procesos de torrefacción y pirólisis.

Figure 1. Summary of the production of carbonaceous materials through torrefaction and pyrolysis processes.

Uno de los procesos térmicos más estudiados en torno a la obtención de materiales carbonosos es la pirólisis. Este se lleva a cabo a temperaturas altas (400-700 °C) y consiste en la descomposición térmica de la biomasa en una atmósfera libre de oxígeno. Numerosos factores pueden influir en la pirólisis y el rendimiento de los productos (Su et al., 2022); entre ellos se encuentran la razón de calentamiento (°C/min), el tiempo de reacción (min) y el contenido de carbono (composición química). La pirólisis genera tres corrientes de producto: biogás, biocrudo y biocarbón. El rendimiento asociado a cada una depende en gran medida de las condiciones de trabajo y la materia prima seleccionada (Hadiya et al., 2022). Las investigaciones sobre este proceso suelen enfocarse en su optimización según el producto deseado y sus características (Ahmad et al., 2021).

En cuanto a las condiciones de operación, existen diversos tipos de pirólisis: rápida, lenta, al vacío, *flash*, hidropirólisis e intermedia. Cada una opera bajo condiciones específicas de velocidad de calentamiento, humedad y presión, las cuales pueden variar según el objetivo (Eze et al., 2021). De los tipos mencionados, la pirólisis lenta suele ofrecer mayores rendimientos en la obtención de producto sólido (carbón), por lo tanto, resulta la más relevante para la evaluación de materiales carbonosos y es la más empleada en las investigaciones relacionadas con bioenergía (Raheem et al., 2015; Vithanage et al., 2017).

Otra alternativa que permite altos rendimientos para el material sólido es la torrefacción, la cual difiere de la pirólisis en que se lleva a cabo a temperaturas moderadas (200-300 °C), y puede desarrollarse en atmósferas con cierto contenido de oxígeno. Una característica importante es que los productos obtenidos a partir de este proceso son hidrofóbicos (Chen, Lin et al., 2018), lo que minimiza el reingreso de humedad en el producto y mejora su estabilidad. Durante la torrefacción, se eliminan compuestos volátiles, pero no se alcanza una degradación completa de la celulosa, la hemicelulosa ni la lignina, sino que ocurren transformaciones estructurales y ruptura de las cadenas poliméricas (Chen, Gao et al., 2018).

Dado que mediante la torrefacción se obtienen cadenas poliméricas más sencillas, el material final adquiere una mayor densidad energética y mejores propiedades mecánicas para su procesamiento posterior (Arteaga-Perez et al., 2015; Chen et al., 2021). Las investigaciones sobre la torrefacción de biomasa suelen enfocarse en la evaluación energética del producto obtenido (Fryda et al., 2014; Manouchehrinejad & Mani, 2018; Tong et al., 2021; Zhang, Yang, et al., 2022). Sin embargo, en los últimos años se ha avanzado en el estudio de aplicaciones alternas por medio del aprovechamiento de las características estructurales de los productos finales (Chen et al., 2021; Thengane et al., 2022; Thrän et al., 2016).

La torrefacción se clasifica de forma general según las condiciones de operación: seca y húmeda. La torrefacción seca se efectúa en atmósferas no oxidativas (N_2, CO_2 o combinaciones de ambos) u oxidativas (aire,

O_2). En atmósferas oxidativas se presentan ventajas como tiempos de procesamiento más cortos y menores costos de operación en comparación con el escenario no oxidativo (Chen et al., 2021; Hu et al., 2022). No obstante, el proceso ofrece rendimientos más bajos al elevarse la temperatura, debido a la oxidación de los distintos componentes, lo que a su vez complica el control de la temperatura (Arteaga-Perez et al., 2015).

En cuanto a la torrefacción húmeda, esta se lleva a cabo en condiciones de temperaturas moderadas (175-250 °C) en un medio acuoso, pero bajo condiciones que garanticen la saturación del agua (20-60 bar). Esto presenta como ventaja técnica la posibilidad de trabajar con materiales húmedos, pero a su vez requiere el uso de reactores que soporten la presión necesaria (Arteaga-Perez et al., 2015) y la respectiva separación de las tres corrientes obtenidas (Alam & Peela, 2022). Este tipo de torrefacción permite obtener un sólido que retiene un alto porcentaje energético y una corriente gaseosa rica en CO_2, con bajo contenido de compuestos volátiles (Alam et al., 2021; Arteaga-Perez et al., 2015).

En Costa Rica existen algunas experiencias en la producción de biocarbón (biochar) a nivel de planta piloto industrial. Un ejemplo es el Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE), donde se trabaja con los residuos del cultivo de dicho grano para elaborar pelets de biochar de pulpa y mucílago. Otro caso es Poás Bioenergy, que ha escalado su proceso piloto para trabajar con residuos de las industrias forestal y cafetalera. A estos se suma Arrocera San Pedro Lagunilla S. A., que produce briquetas a partir de cascarilla de arroz. Estas empresas están desarrollando o adaptando tecnología para la obtención de materiales carbonosos, pero enfrentan dificultades como la humedad de la biomasa y la adaptación o el diseño de los equipos en función de la biomasa. Por lo tanto, a nivel operativo, las limitaciones se relacionan con la adaptación y el escalado del proceso a las materias primas, no con el conocimiento de la tecnología, ya que se cuenta con empresas especializadas y personal operativo capacitado.

Respecto a las limitaciones a nivel de mercado, en Costa Rica, a pesar del uso tradicional del carbón como bioenergético o en aplicaciones agrícolas, no existe un conocimiento amplio sobre la obtención de materiales carbonos con aplicaciones novedosas. Esto evidencia la necesidad de apoyar este tipo de iniciativas y reforzar estudios orientados a la producción, estandarización y análisis del ciclo de vida de los procesos en desarrollo, que conduzcan al aprovechamiento de materias primas alternativas en el contexto nacional, tales como el bambú, para la elaboración de productos con mayor valor agregado.

Materiales carbonosos a partir de bambú y sus aplicaciones

Existe una amplia cantidad de estudios relacionados con diversas biomasas en torno a la producción de materiales carbonosos, incluido el bambú (Alam et al., 2021; Chen et al., 2016; Wen et al., 2014; Yek et al., 2021). Uno de los aspectos relevantes de estas investigaciones es la especie analizada, ya que permite establecer una línea base con respecto a las especies presentes en Costa Rica. Dado que el análisis se enfoca en los materiales carbonosos obtenidos, también se debe abordar el procesamiento térmico al cual se sometió la biomasa, de manera que sea posible indagar el nivel de estudio de los distintos procesos aplicados al bambú (Abdulyekeen et al., 2021; Hadiya et al., 2022; Oyedun et al., 2013).

Las aplicaciones de los materiales carbonosos se extienden más allá del campo agronómico o energético, y su potencial depende en gran medida de los tratamientos posteriores a la obtención del carbón base (Fromm et al., 2018; Khuong et al., 2021). Por ello, es importante abordar estos tratamientos, cuando los haya, y cómo se relacionan con la aplicación final y su eficacia, con el fin de establecer posibles alcances de investigaciones futuras en el país. Un compendio de los estudios asociados a la producción de materiales carbonosos en los que se emplea bambú como materia prima se expone en los siguientes cuadros. Los trabajos que utilizan la pirólisis como tratamiento térmico se muestran en el Cuadro 1, mientras que las investigaciones que emplean torrefacción se exhiben en el Cuadro 2. Además, se incluyen los tratamientos adicionales aplicados a la biomasa, así como sus usos.

Cuadro 1. Recopilación de estudios en torno a la producción de materiales carbonosos a partir de diversas especies de bambú con énfasis en la pirólisis como tratamiento térmico.

Table 1. Compilation of studies on the production of carbonaceous materials from various bamboo species, with emphasis on pyrolysis as a thermal treatment.

Especie estudiada	Tratamiento empleado	Tratamiento posterior	Aplicación final	Fuente
No especifica	Pirólisis	Impregnación química y compresión mecánica	Electrodos celdas solares	Gao et al. (2020)
No especifica	Pirólisis	Ninguno	Ninguna	Gautam y Chaurasia (2020)
No especifica	Pirólisis	Modificación con plasma	Captura de metales pesados	Hu, Xiao, et al. (2020)
No especifica	Pirólisis	Ninguno	Ninguna	Rao et al. (2023)
No especifica	Pirólisis	Activación química	Adsorción de componentes sulfurados de combustibles	Yang et al. (2018)
No especifica	Pirólisis	Activación física	Captura de metales pesados	Zhou et al. (2014)
Arundinaria amabilis*, *Bambusa maculata* y *Phyllostachys pubescens	Pirólisis	Térmico (1100-2100 ºC) En atmósfera inerte	Ánodos para baterías de litio	Fromm et al. (2018)
Dendrocalamus asper	Pirólisis	Activación física e impregnación química	Remoción de formaldehído del aire	Rengga et al. (2017)
Phyllostachys edulis	Pirólisis	Ninguno	Ninguna	Chen et al. (2016)
Phyllostachys edulis	Pirólisis	Ninguno	Ninguna	Dong et al. (2021)
Phyllostachys edulis	Pirólisis	Activación física con CO_2	Carbón activado	Khuong et al. (2021)
Phyllostachys pubescens	Pirólisis	Ninguno	Combustible	Hu et al. (2021)

Cuadro 2. Recopilación de estudios en torno a la producción de materiales carbonosos a partir de diversas especies de bambú, con énfasis en la torrefacción como tratamiento térmico.

Table 2. Compilation of studies on the production of carbonaceous materials from various bamboo species, with emphasis on torrefaction as a thermal treatment.

Especie estudiada	Tratamiento empleado	Tratamiento posterior	Aplicación final	Fuente
No especifica	Torrefacción	Tratamiento químico con NaOH	Adsorción de plomo	Shen et al. (2021)
No especifica	Torrefacción	Ninguno	Combustible	Hu et al. (2022)
Bambusa sinospinosa	Torrefacción	Ninguno	Combustible	Chen et al. (2015)
Bambusa tulda	Torrefacción húmeda	Ninguno	Combustible	Alam et al. (2021)
Guadua angustifolia	Torrefacción	Ninguno	Combustible	Fryda et al. (2014)
Phyllostachys edulis	Torrefacción	Ninguno	Materia prima para pirólisis	Ma et al. (2019)
Phyllostachys pubescens	Torrefacción	Ninguno	Combustible	Hu, Song, et al. (2020)
Phyllostachys sulphurea	Torrefacción	Ninguno	Ninguna	Li et al. (2015)

Algunas de las investigaciones consultadas no reportaron la especie de bambú analizada, debido a que se utilizaron subproductos de industrias como la papelera o la de procesamiento primario del bambú. Esto provoca que se pierda la trazabilidad de la materia prima, pero se puede asumir una mezcla compuesta de residuos de la actividad industrial. Sin embargo, en los estudios que sí consideraron la especie de bambú se observaron resultados muy variados (Gao et al., 2020; Gautam & Chaurasia, 2020; Hu, Xiao, et al., 2020; Hu et al., 2022; Rao et al., 2023; Shen et al., 2021; Yang et al., 2018; Zhou et al., 2014). Lo anterior evidencia una oportunidad clave de investigación para optimizar el proceso y la caracterización de la materia prima y los productos obtenidos. Cada vez son más comunes los trabajos asociados a materiales carbonosos con aplicaciones distintas al uso energético, incluso en el caso de materiales provenientes de torrefacción a baja temperatura (Gao et al., 2020; Hu, Song, et al., 2020; Shen et al., 2021).

Otro aspecto por considerar es la caracterización de los productos obtenidos, la cual resulta relevante tanto a escala de laboratorio como en fases piloto o industrial, ya que permite explicar el comportamiento de los productos, o bien controlar su calidad (Wang & Jan, 2018). En los estudios consultados, las técnicas de caracterización utilizadas se agrupan en dos grandes categorías: aquellas que hacen posible explicar el comportamiento químico de los productos mediante la presencia de grupos funcionales con técnicas como FTIR (Chen et al., 2016; Dong et al., 2021; Khuong et al., 2021; Li et al., 2015; Ma et al., 2019; Rao et al., 2023; Shen et al., 2021) y espectroscopía Raman (Fromm et al., 2018; Gao et al., 2020; Yang et al., 2018), y aquellas que posibilitan describir el comportamiento y la estructura física del material, entre las que destacan la microscopía electrónica (SEM, REM, TEM) (Dong et al., 2021; Fromm et al., 2018; Gao et al., 2020; Hu, Xiao et al., 2020; Rao et al., 2023; Rengga et al., 2017).

Contexto productivo del bambú en Costa Rica

En Costa Rica, el cultivo de bambú no se ha establecido de manera significativa. Los primeros esfuerzos hacia su tecnificación datan de inicios de la década de 1980, en el marco de proyectos de cooperación con países asiáticos (Deras, 2003). Sin embargo, debido a la carencia de esfuerzos gubernamentales y a la escasa articulación del sector productivo, no fue sino hasta el periodo 2008-2015 que se retomaron acciones enfocadas no solo en el cultivo, sino también en la industrialización de esta materia prima y la cuantificación de su potencial biomásico (Alegría, 2013; Briceño Elizondo et al., 2017).

El cultivo en el país se enfoca en varias especies de los géneros *Bambusa*, *Dendrocalamus*, *Guadua* y *Phyllostachys* (Calvo & Avilés, 2003). Estas se han adaptado bien a las condiciones climáticas y edáficas del país, y se utilizan con diversos fines (Deras, 2003). Además, un aspecto por resaltar acerca del bambú es el creciente interés en la bioeconomía y la búsqueda de alternativas sostenibles, ya que este cultivo puede ser de relevancia para el aprovechamiento circular de los recursos agroforestales (Awasthi et al., 2020; INBAR, 2023; Li et al., 2018).

Actualmente, no se cuenta con una medición específica del área cultivada en el país ni de los usos y manejos aplicados a las plantaciones de todas las especies cultivadas. Tampoco se dispone de información sobre el tipo de asociación con otros sistemas agroproductivos, lo cual impide determinar el volumen de biomasa que podría generarse y su vinculación con un modelo productivo centrado en economía o bioeconomía circulares, como lo sería la cantidad de carbono a fijar (Ding et al., 2023; Guerra et al., 2016). No obstante, es posible hacer referencia a investigaciones acerca de diversas especies en otras regiones, incluyendo aquellas mencionadas en el último informe técnico de INBAR (2022) como especies de relevancia económica, reportadas en Costa Rica por dicha fuente o por productores nacionales.

Para *Guadua angustifolia*, originaria de Suramérica pero naturalizada en Costa Rica, se han desarrollado estudios sobre manejo, productividad, fijación de carbono e inventario de biomasa (Alegría, 2013; Briceño Elizondo et al., 2017). Estos trabajos se han enfocado en las áreas productivas ubicadas en las inmediaciones

de la península de Osa (Briceño Elizondo et al., 2017), Guápiles (Alegría, 2013) y la zona del embalse Arenal (Hernández Ávila, 2022), con resultados variables en términos de productividad, madurez y manejo de plantación. En algunos casos se han registrado porcentajes de pérdida considerables a causa de manejos deficientes (Hernández Ávila, 2022). Sin embargo, se han obtenido datos relevantes, como estimaciones de fijación de carbono entre 20 y 54 t ha^{-1} (Briceño Elizondo et al., 2017).

Un aspecto clave identificado en esta revisión es la existencia de vacíos investigativos acerca de las especies reportadas, ya sea por la antigüedad de los estudios disponibles o por la ausencia de estos, como es el caso de algunos aspectos de las especies nativas. Una síntesis de la información sobre las especies que podrían tener importancia en el país se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Síntesis de información técnica respecto a la productividad de distintas especies de bambú con relevancia económica reportadas en Costa Rica.

Table 3. Synthesis of technical information on the productivity of various economically relevant bamboo species reported in Costa Rica.

Especie	Potencial de biomasa aérea	Origen de la especie	Usos industriales	Usos alternativos
Bambusa bambos	8527 kg·ha^{-1} para 3 años (Rao & Nagarajaiah, 1991)	India y sudeste asiático (INBAR, 2022)	Pulpa de papel, laminados, carbón (INBAR, 2022)	Biorrefinería Restauración ecológica (INBAR, 2022)
Bambusa vulgaris	10 t·ha^{-1}·$año^{-1}$ (Nfornkah et al., 2020)	China, India y sudeste asiático (INBAR, 2022)	Pulpa de papel, laminados, carbón (INBAR, 2022)	Biorrefinería Biocombustibles (INBAR, 2022)
Dendrocalamus asper	16 t·ha^{-1}·$año^{-1}$ (Pungbun, 2000)	China, sudeste y pacífico asiático (INBAR, 2022)	Laminados, pisos (INBAR, 2022)	Biorrefinería Biocombustibles (INBAR, 2022)
Guadua aculeata	No reportado	México y Centroamérica (INBAR, 2022)	Carbón (INBAR, 2022)	Biorrefinería Biocombustibles (INBAR, 2022)
Guadua angustifolia	12,9 t·ha^{-1}·$año^{-1}$ (Riaño et al., 2002)	Suramérica (INBAR, 2022)	Laminados, pulpa de papel, carbón (INBAR, 2022)	No reportados
Guadua amplexifolia	No reportado	México, Centroamérica y norte de Suramérica (INBAR, 2022)	Carbón (INBAR, 2022)	No reportados
Phyllostachys aurea	No reportado	Sudeste de China y Vietnam (INBAR, 2022)	Carbón, briquetas y pelets para bioenergía (INBAR, 2022)	Biorrefinería Restauración ecológica (INBAR, 2022)
Phyllostachys edulis	14,07 Mg·ha^{-1}·$año^{-1}$ (Zhang et al., 2014)	Centro-sur y sudeste de China, Taiwán (INBAR, 2022)	Laminados, pulpa de papel, carbón (INBAR, 2022)	Biorrefinería (INBAR, 2022)

Se evidencia una oportunidad de estudio que cuantifique variables de interés para el sector productivo actual, así como para potenciales aplicaciones industriales basadas en la obtención y comercialización de materiales carbonosos a partir del bambú, debido a la falta de mediciones y datos que permitan predecir con exactitud el potencial de producción de dichos materiales y sus residuos. No obstante, se cuenta con información sobre la productividad en otras regiones geográficas de especies también presentes en Costa Rica; la mayoría corresponde a

especies de origen asiático que han sido estudiadas por el rol que cumple el bambú como materia prima o insumo en diversos sectores productivos en esos lugares (Biswas et al., 2022; Van Dam et al., 2018).

Conclusiones

Los estudios indagados muestran que las principales rutas para la obtención de materiales carbonosos a partir de bambú se basan en procesos de torrefacción y pirólisis, los cuales pueden requerir condiciones de atmósferas inertes y control de temperatura. Sin embargo, aún no existe un estándar metodológico consolidado, lo que evidencia la necesidad de desarrollar protocolos uniformes, considerando factores como condiciones de pirólisis, atmósferas de reacción y temperaturas óptimas. La estandarización facilitaría su aplicación a nivel industrial y académico, e impulsaría la eficiencia y reproducibilidad de los procesos.

La investigación sobre usos alternativos de los materiales carbonosos derivados del bambú ha adquirido una relevancia creciente, con un enfoque en la generación de productos de alto valor agregado y aplicaciones estratégicas en el sector ambiental, como la captura de contaminantes. Este avance destaca el potencial de esta planta como materia prima clave dentro de un modelo de bioeconomía circular.

La valorización de los residuos de la industrialización del bambú representa una oportunidad para el desarrollo de aplicaciones innovadoras. No obstante, la falta de información acerca de la producción e industrialización de esta planta en Costa Rica limita la posibilidad de determinar el volumen de biomasa aprovechable para la fabricación de materiales carbonosos. Esto resalta la urgencia de realizar estudios integrales sobre su cadena de valor en el país, a fin de definir estrategias de uso sostenible.

Un punto de especial interés es el potencial de las especies nativas de bambú, en particular aquellas del género *Guadua*, cuyos culmos presentan propiedades que los hacen idóneos para aplicaciones industriales. La identificación y valorización de los subproductos generados por estas especies podría impulsar de manera significativa su utilización en distintos ámbitos.

Ante la carencia de datos acerca del sector productivo y la biomasa aprovechable del bambú, se recomienda llevar a cabo investigaciones detalladas sobre la distribución, crecimiento y aprovechamiento de esta planta en el país, especialmente en cuanto a variables de generación de biomasa, fijación de carbono y propiedades fisicoquímicas. Esto permitiría determinar su viabilidad para aplicaciones alternativas y fortalecer su incorporación dentro de la bioeconomía circular de Costa Rica.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Estatal a Distancia por el apoyo al proyecto PRY-0050-2021, inscrito en la Vicerrectoría de Investigación.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

Abdulyekeen, K. A., Umar, A. A., Patah, M. F. A., & Daud, W. M. A. W. (2021). Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *150*, Article 111436. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111436

Ahmad, M. S., Liu, C. G., Nawaz, M., Tawab, A., Shen, X., Shen, B., & Mehmood, M. A. (2021). Elucidating the pyrolysis reaction mechanism of *Calotropis procera* and analysis of pyrolysis products to evaluate its potential for bioenergy and chemicals. *Bioresource Technology*, *322*, Article 124545. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124545

Ahmad, A., Priyadarshini, M., Yadav, S., Ghangrekar, M. M., & Surampalli, R. Y. (2022). The potential of biochar-based catalysts in advanced treatment technologies for efficacious removal of persistent organic pollutants from wastewater: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, *187*, 470–496. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.09.024

Alam, M., & Peela, N. R. (2022). Catalytic co-pyrolysis of wet-torrefied bamboo sawdust and plastic over the zeolite HY: Synergism and kinetics. *Journal of the Energy Institute*, *100*, 76–88. https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.11.004

Alam, M., Rammohan, D., Bhavanam, A., & Peela, N. R. (2021). Wet torrefaction of bamboo saw dust and its co-pyrolysis with plastic. *Fuel*, *285,* Article 119188. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119188

Alegría, A. (2013). *Manejo Sostenible del recurso Guadua angustifolia en Costa Rica y su potencial para la mitigación del cambio climático. Estudio de caso: Plantación de Guadua angustifolia variedad Atlántica en la Estación Experimental los Diamantes, Guápiles* [Tesis de maestría no publicada]. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Arteaga-Perez, L. E., Flores, M., Escobar, M., Segura, C., & Gordon, A. (2015). Análisis comparativo de la torrefacción húmeda y seca de *Pinus radiata*. *Energética*, *46*, 5–12. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147043932002

Awasthi, M. K., Duan, Y., Liu, T., Awasthi, S. K., & Zhang, Z. (2020). Relevance of biochar to influence the bacterial succession during pig manure composting. *Bioresource Technology*, *304,* Article 122962. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122962

Biswas, S., Rahaman, T., Gupta, P., Mitra, R., Dutta, S., Kharlyngdoh, E., Guha, S., Ganguly, J., Pal, A., & Das, M. (2022). Cellulose and lignin profiling in seven, economically important bamboo species of India by anatomical, biochemical, FTIR spectroscopy and thermogravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy*, *158,* Article 106362. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106362

Briceño Elizondo, E., Villalobos Barquero, V., Vargas Fonseca, L., Guevara Bonilla, M., & Esquivel Segura, E. (2017 octube 27-29). *Potencial de crecimiento y almacenamiento de carbono en plantaciones de bambú Guadua (Guadua angustifolia) en la Zona Sur de Costa Rica* [Ponencia general]. Primer Congreso de Bambú, Ciudad de México, México. https://1ercongresobambu.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/02/elemer-bricec3b1o-potencial-de-crecimiento-y-almacenamiento-de-carbono-en-plantaciones-de-bambc3ba-guadua-en-la-zona-sur-de-costa-rica.pdf

Calvo, I., & Avilés, R. (2003). *Diagnóstico del cultivo del bambú: análisis de sus modalidades de explotación*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E21-7713.pdf

Chen, D., Gao, A., Cen, K., Zhang, J., Cao, X., & Ma, Z. (2018). Investigation of biomass torrefaction based on three major components: hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy Conversion and Management*, *169*, 228–237. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.063

Chen, W.-H., Lin, B.-J., Colin, B., Chang, J.-S., Pétrissans, A., Bi, X., & Pétrissans, M. (2018). Hygroscopic transformation of woody biomass torrefaction for carbon storage. *Applied Energy, 231*, 768–776. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.135

Chen, W.-H., Lin, B.-J., Lin, Y.-Y., Chu, Y.-S., Ubando, A. T., Show, P. L., Ong, H. C., Chang, J.-S., Ho, S.-H., Culaba, A. B., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2021). Progress in biomass torrefaction: principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science, 82*, Article 100887. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887

Chen, W.-H., Liu, S.-H., Juang, T.-T., Tsai, C.-M., & Zhuang, Y.-Q. (2015). Characterization of solid and liquid products from bamboo torrefaction. Applied Energy, 160, 829–835. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.022

Chen, D., Yu, X., Song, C., Pang, X., Huang, J., & Li, Y. (2016). Effect of pyrolysis temperature on the chemical oxidation stability of bamboo biochar. *Bioresource Technology, 218*, 1303–1306. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.112

Deras, J. E. (2003). *Análisis de la cadena productiva del bambú en Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Repositorio CATIE. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4145

Dharmaraja, J., Shobana, S., Arvindnarayan, S., Francis, R. R., Jeyakumar, R. B., Saratale, R. G., Ashokkumar, V., Bhatia, S. K., Kumar, V., & Kumar, G. (2023). Lignocellulosic biomass conversion *via* greener pretreatment methods towards biorefinery applications. *Bioresource Technology, 369*, Article 128328. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128328

Ding, Z., Kumar Awasthi, S., Kumar, M., Kumar, V., Mikhailovich Dregulo, A., Yadav, V., Sindhu, R., Binod, P., Sarsaiya, S., Pandey, A., Taherzadeh, M. J., Rathour, R., Singh, L., Zhang, Z., Lian, Z., & Kumar Awasthi, M. (2023). A thermo-chemical and biotechnological approaches for bamboo waste recycling and conversion to value added product: towards a zero-waste biorefinery and circular bioeconomy. *Fuel*, *333*, Article 126469. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126469

Dong, Q., Ren, S., Zhang, S., Huang, S., Guo, Y., Li, H., Nie, L., Sun, Z., & Du, Y. (2021). Role of calcium ion in moso bamboo pyrolysis under microwave irradiation. *Fuel Processing Technology*, *211,* Article 106598. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106598

Dubey, P., Shrivastav, V., Maheshwari, P. H., & Sundriyal, S. (2020). Recent advances in biomass derived activated carbon electrodes for hybrid electrochemical capacitor applications: challenges and opportunities. *Carbon*, *170,* 1–29. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.056

Eze, W. U., Umunakwe, R., Obasi, H. C., Ugbaja, M. I., Uche, C. C., & Madufor, I. C. (2021). Plastics waste management: a review of pyrolysis technology. *Clean Technologies and Recycling*, *1*(1), 50–69. https://doi.org/10.3934/ctr.2021003

Fromm, O., Heckmann, A., Rodehorst, U. C., Frerichs, J., Becker, D., Winter, M., & Placke, T. (2018). Carbons from biomass precursors as anode materials for lithium-ion batteries: new insights into carbonization and graphitization behavior and into their correlation to electrochemical performance. *Carbon*, *128*, 147–163. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.11.065

Fryda, L., Daza, C., Pels, J., Janssen, A., & Zwart, R. (2014). Lab-scale co-firing of virgin and torrefied bamboo species Guadua angustifolia Kunth as a fuel substitute in coal fired power plants. *Biomass and Bioenergy*, *65*, 28–41. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.044

Gao, L., Zhou, Y., Meng, F., Li, Y., Liu, A., Li, Y., Zhang, C., Fan, M., Wei, G., & Ma, T. (2020). Several economical and eco-friendly bio-carbon electrodes for highly efficient perovskite solar cells. *Carbon*, *162*, 267–272. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.049

Gautam, N., & Chaurasia, A. (2020). Study on kinetics and bio-oil production from rice husk, rice straw, bamboo, sugarcane bagasse and neem bark in a fixed-bed pyrolysis process. *Energy*, *190,* Article 116434. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116434

Guerra, S. P. S., Oguri, G., De Jesus Eufrade, H., Xavier de Melo, R., & Spinelli, R. (2016). Mechanized harvesting of bamboo plantations for energy production: preliminary tests with a cut-and-shred harvester. *Energy for Sustainable Development, 34*, 62-66. https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.07.005

Hadiya, V., Popat, K., Vyas, S., Varjani, S., Vithanage, M., Kumar Gupta, V., Núñez Delgado, A., Zhou, Y., Loke Show, P., Bilal, M., Zhang, Z., Sillanpää, M., Sabyasachi Mohanty, S., & Patel, Z. (2022). Biochar production with amelioration of microwave-assisted pyrolysis: current scenario, drawbacks and perspectives. *Bioresource Technology, 355*, Article 127303. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127303

Hernández Ávila, O. (2022). *Modelo de asociatividad empresarial para el uso sostenible de las plantaciones de bambú (Guadua angustifolia Kunth) existentes en los terrenos del embalse Arenal del Instituto Costarricense de Electricidad* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Costa Rica]. Repositorio UNA. http://hdl.handle.net/11056/25660

Hu, W., Feng, Z., Yang, J., Gao, Q., Ni, L., Hou, Y., He, Y., & Liu, Z. (2021). Combustion behaviors of molded bamboo charcoal: influence of pyrolysis temperatures. *Energy, 226*, Article 120253. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120253

Hu, J., Song, Y., Liu, J., Evrendilek, F., Buyukada, M., Yan, Y., & Li, L. (2020). Combustions of torrefaction-pretreated bamboo forest residues: physicochemical properties, evolved gases, and kinetic mechanisms. *Bioresource Technology, 304*, Article 122960. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122960

Hu, J., Song, Y., Liu, J., Evrendilek, F., Zhang, G., Ren, M., Xie, W., & Sun, S. (2022). Torrefaction-assisted oxy-fuel co-combustion of textile dyeing sludge and bamboo residues toward enhancing emission-to-ash desulfurization in full waste circularity. *Fuel, 318*, Article 123603. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123603

Hu, R., Xiao, J., Wang, T., Gong, Y., Chen, G., Chen, L., & Tian, X. (2020). Highly concentrated amino-modified biochars using a plasma: evolution of surface composition and porosity for heavy metal capture. *Carbon, 168*, 515–527. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.012

Huang, M., Ma, Z., Zhou, B., Yang, Y., & Chen, D. (2020). Enhancement of the production of bio-aromatics from renewable lignin by combined approach of torrefaction deoxygenation pretreatment and shape selective catalytic fast pyrolysis using metal modified zeolites. *Bioresource Technology*, *301*, Article 122754. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122754

Huang, Y., Tao, B., Lal, R., Lorenz, K., Jacinthe, P. A., Shrestha, R. K., Bai, X., Singh, M. P., Lindsey, L. E., & Ren, W. (2023). A global synthesis of biochar's sustainability in climate-smart agriculture - Evidence from field and laboratory experiments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *172*, Article 113042. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113042

Kaikiti, K., Stylianou, M., & Agapiou, A. (2021). Development of food-origin biochars for the adsorption of selected volatile organic compounds (VOCs) for environmental matrices. *Bioresource Technology*, *342*, Article 125881. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125881

Kakati, U., Sakhiya, A. K., Baghel, P., Trada, A., Mahapatra, S., Upadhyay, D., & Kaushal, P. (2022). Sustainable utilization of bamboo through air-steam gasification in downdraft gasifier: experimental and simulation approach. *Energy*, *252*, Article 124055. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124055

Khan, N., Chowdhary, P., Gnansounou, E., & Chaturvedi, P. (2021). Biochar and environmental sustainability: emerging trends and techno-economic perspectives. *Bioresource Technology, 332*, Article 125102. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125102

Khiari, B., Jeguirim, M., Limousy, L., & Bennici, S. (2019). Biomass derived chars for energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *108*, 253–273. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.057

Khuong, D. A., Nguyen, H. N., & Tsubota, T. (2021). Activated carbon produced from bamboo and solid residue by CO_2 activation utilized as CO_2 adsorbents. *Biomass and Bioenergy*, *148*, Article 106039. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106039

Li, J., Dai, J., Liu, G., Zhang, H., Gao, Z., Fu, J., He, Y., & Huang, Y. (2016). Biochar from microwave pyrolysis of biomass: a review. *Biomass and Bioenergy*, *94*, 228–244. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.09.010

Li, J., Dou, B., Zhang, H., Zhang, H., Chen, H., Xu, Y., & Wu, C. (2021). Pyrolysis characteristics and non-isothermal kinetics of waste wood biomass. *Energy*, *226,* Article 120358. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120358

Li, M.-F., Li, X., Bian, J., Chen, C.-Z., Yu, Y.-T., & Sun, R.-C. (2015). Effect of temperature and holding time on bamboo torrefaction. *Biomass and Bioenergy*, *83*, 366–372. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.016

Li, T., Remón, J., Jiang, Z., Budarin, V. L., & Clark, J. H. (2018). Towards the development of a novel "bamboo-refinery" concept: selective bamboo fractionation by means of a microwave-assisted, acid-catalysed, organosolv process. *Energy Conversion and Management, 155*, 147–160. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.077

Ma, Z., Zhang, Y., Shen, Y., Wang, J., Yang, Y., Zhang, W., & Wang, S. (2019). Oxygen migration characteristics during bamboo torrefaction process based on the properties of torrefied solid, gaseous, and liquid products. *Biomass and Bioenergy*, *128*, Article 105300. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105300

Manouchehrinejad, M., & Mani, S. (2018). Torrefaction after pelletization (TAP): analysis of torrefied pellet quality and co-products. *Biomass and Bioenergy*, *118*, 93–104. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.08.015

Montiel, M., & Murillo, L. (1998). Historia ecológica y aprovechamiento del bambú. *Revista de Biología Tropical, 46*(S3), 11–18.

Nfornkah, B. N., Kaam, R., Zapfack, L., Tchamba, M., & Chimi, D. C. (2020). Bamboo diversity and carbon stocks of dominant species in different agro-ecological zones in Cameroon. *African Journal of Environmental Science and Technology*, *14*(10), 290–300. https://doi.org/10.5897/AJEST2020.2871

Nistratov, A. V., Klushin, V. N., Makashova, E. S., & Kim, L. V. (2020). Production and evaluation of properties of waste-based carbon adsorbent. *Chemical Engineering Research and Design*, *160*, 551–560. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.06.016

Organización Internacional del Bambú y el Ratán. (2022). *Global priority species of economically important bamboo* (INBAR Technical Report No. 44). https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2023/02/Global-Priority-Species-of-Economically-Important-Bamboo-Final-version.pdf

Organización Internacional del Bambú y el Ratán. (2023). *Resumen anual 2022*. https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2023/07/AH2022-ES.pdf

Oyedun, A. O., Gebreegziabher, T., & Hui, C. W. (2013). Mechanism and modelling of bamboo pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, *106*, 595–604. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.031

Patel, B., Patel, A., Syed, B. A., Gami, B., & Patel, P. (2021). Assessing economic feasibility of bio-energy feedstock cultivation on marginal lands. *Biomass and Bioenergy*, *154*, Article 106273. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106273

Pungbun, N. A. P. (2000) Bamboo resources and utilization in Thailand. In L. Puangchit, B. Thaiutsa, & S. Thamincha (Eds.), *Bamboo 2000. Proceedings of the International Symposium of Royal Project Foundation* (pp. 6–12). Asksorn Siam Printing.

Qu, X., Fu, H., Mao, J., Ran, Y., Zhang, D., & Zhu, D. (2016). Chemical and structural properties of dissolved black carbon released from biochars. *Carbon*, *96*, 759–767. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.09.106

Raheem, A., Wan Azlina, W. A. K. G., Taufiq Yap, Y. H., Danquah, M. K., & Harun, R. (2015). Thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *49*, 990–999. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.186

Rao, N. S., & Nagarajaiah, C. (1991). Evaluation of *Bambusa arundinacea* (Retz.) Willd. for growth and biomass production in dry land ecosystem. *Myforest, 27,* 70-74.

Rao, G., Shao, J., Chen, X., Fu, L., Zhang, X., Zhang, J., Wang, Q., Krivoshapkin, P., Krivoshapkina, E., & Chen, H. (2023). A new strategy of preparing high-value products by co-pyrolysis of bamboo and ZIF-8. *Fuel Processing Technology*, *243*, Article 107669. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107669

Rengga, W. D. P., Chafidz, A., Sudibandriyo, M., Nasikin, M., & Abasaeed, A. E. (2017). Silver nano-particles deposited on bamboo-based activated carbon for removal of formaldehyde. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *5*(2), 1657–1665. https://doi.org/10.1016/J.JECE.2017.02.033

Riaño, N. M., Londoño, X., López, Y., & Gómez, J. H. (2002). Plant growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in the Valle del Cauca – Colombia. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society*, *16*(1), 43–51.

Sangsuk, S., Buathong, C., & Suebsiri, S. (2020). High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production. *Energy for Sustainable Development*, *59*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.008

Sattasathuchana, S., Parnthong, J., Youngian, S., Faungnawakij, K., Rangsunvigit, P., Kitiyanan, B., Khunphonoi, R., Wanichsombat, A., Grisdanurak, N., & Khemthong, P. (2023). Energy efficiency of bio-coal derived from hydrothermal carbonized biomass: Assessment as sustainable solid fuel for municipal biopower plant. *Applied Thermal Engineering*, *221*, Article 119789. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119789

Shen, Y., Guo, J.-Z., Bai, L.-Q., Chen, X.-Q., & Li, B. (2021). High effective adsorption of Pb(II) from solution by biochar derived from torrefaction of ammonium persulphate pretreated bamboo. *Bioresource Technology, 323*, Article 124616. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124616

Singh, G., Kim, I. Y., Lakhi, K. S., Srivastava, P., Naidu, R., & Vinu, A. (2017). Single step synthesis of activated bio-carbons with a high surface area and their excellent CO_2 adsorption capacity. *Carbon*, *116*, 448–455. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.02.015

Soltani, N., Bahrami, A., Giebeler, L., Gemming, T., & Mikhailova, D. (2021). Progress and challenges in using sustainable carbon anodes in rechargeable metal-ion batteries. *Progress in Energy and Combustion Science*, *87*, Article 100929. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100929

Song, B., Cao, X., Gao, W., Aziz, S., Gao, S., Lam, C.-H., & Lin, R. (2022). Preparation of nano-biochar from conventional biorefineries for high-value applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *157,* Article 112057. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112057

Su, G., Ong, H. C., Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., & Ok, Y. S. (2022). Pyrolysis of waste oils for the production of biofuels: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, *424*, Article 127396. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127396

Suresh, S., & Bandosz, T. J. (2018). Removal of formaldehyde on carbon -based materials: a review of the recent approaches and findings. *Carbon*, *137*, 207–221. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.05.023

Thengane, S. K., Kung, K. S., Gomez-Barea, A., & Ghoniem, A. F. (2022). Advances in biomass torrefaction: parameters, models, reactors, applications, deployment, and market. *Progress in Energy and Combustion Science*, *93,* Article 101040. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101040

Thrän, D., Witt, J., Schaubach, K., Kiel, J., Carbo, M., Maier, J., Ndibe, C., Koppejan, J., Alakangas, E., Majer, S., & Schipfer, F. (2016). Moving torrefaction towards market introduction – Technical improvements and economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the SECTOR project. *Biomass and Bioenergy*, *89*, 184–200. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.004

Tong, S., Sun, Y., Li, X., Hu, Z., Worasuwannarak, N., Liu, H., Hu, H., Luo, G., & Yao, H. (2021). Gas-pressurized torrefaction of biomass wastes: co-gasification of gas-pressurized torrefied biomass with coal. *Bioresource Technology*, *321*, Article 124505. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124505

Valdés-Rodríguez, E. M., Mendoza-Castillo, D. I., Reynel-Ávila, H. E., Aguayo-Villarreal, I. A., & Bonilla-Petriciolet, A. (2022). Activated carbon manufacturing via alternative Mexican lignocellulosic biomass and their application in water treatment: preparation conditions, surface chemistry analysis and heavy metal adsorption properties. *Chemical Engineering Research and Design, 187*, 9–26. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.039

Van Dam, J. E. G., Elbersen, H. W., & Daza Montaño, C. M. (2018). Bamboo production for industrial utilization. In E. Alexopoulou (Ed.), *Perennial grasses for bioenergy and bioproducts: production, uses, sustainability and markets for giant reed, miscanthus, switchgrass, reed canary grass and bamboo* (pp. 175–216). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812900-5.00006-0

Vijayakumar, M., Santhosh, R., Adduru, J., Rao, T. N., & Karthik, M. (2018). Activated carbon fibres as high performance supercapacitor electrodes with commercial level mass loading. *Carbon, 140*, 465–476. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.052

Vithanage, M., Herath, I., Joseph, S., Bundschuh, J., Bolan, N., Ok, Y. S., Kirkham, M. B., & Rinklebe, J. (2017). Interaction of arsenic with biochar in soil and water: a critical review. *Carbon, 113*, 219–230. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.11.032

Wang, W.-C., & Jan, J.-J. (2018). From laboratory to pilot: design concept and techno-economic analyses of the fluidized bed fast pyrolysis of biomass. *Energy, 155*, 139–151. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.012

Wang, Q., Luo, C., Lai, Z., Chen, S., He, D., & Mu, J. (2022). Honeycomb-like cork activated carbon with ultra-high adsorption capacity for anionic, cationic and mixed dye: preparation, performance and mechanism. *Bioresource Technology, 357*, Article 127363. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127363

Wen, J.-L., Sun, S.-L., Yuan, T.-Q., Xu, F., & Sun, R.-C. (2014). Understanding the chemical and structural transformations of lignin macromolecule during torrefaction. *Applied Energy, 121*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.001

Wu, Q., Zhang, L., Ke, L., Zhang, Q., Cui, X., Fan, L., Dai, A., Xu, C., Zhang, Q., Bob, K., Zou, R., Liu, Y., Ruan, R., & Wang, Y. (2023). Co-torrefaction of corncob and waste cooking oil coupled with fast co-pyrolysis for bio-oil production. *Bioresource Technology*, *370*, Article 128529. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128529

Yang, E., Yao, C., Liu, Y., Zhang, C., Jia, L., Li, D., Fu, Z., Sun, D., Robert Kirk, S., & Yin, D. (2018). Bamboo-derived porous biochar for efficient adsorption removal of dibenzothiophene from model fuel. *Fuel*, *211*, 121–129. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.099

Yek, P. N. Y., Cheng, Y. W., Liew, R. K., Wan Mahari, W. A., Ong, H. C., Chen, W.-H., Peng, W., Park, Y.-K., Sonne, C., Kong, S. H., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., & Lam, S. S. (2021). Progress in the torrefaction technology for upgrading oil palm wastes to energy-dense biochar: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151*, Article 111645. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111645

Zhang, C., Sun, S., He, S., & Wu, C. (2022). Direct air capture of CO_2 by KOH-activated bamboo biochar. *Journal of the Energy Institute*, *105*, 399–405. https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.10.017

Zhang, C., Yang, W., Chen, W.-H., Ho, S.-H., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2022). Effect of torrefaction on the structure and reactivity of rice straw as well as life cycle assessment of torrefaction process. *Energy*, *240*, Article 122470. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122470

Zhang, H., Zhuang, S., Sun, B., Ji, H., Li, C., & Zhou, S. (2014). Estimation of biomass and carbon storage of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel Ex Houz.) in Southern China using a diameter–age bivariate distribution model. *Forestry: An International Journal of Forest Research, 87*(5), 674–682. https://doi.org/10.1093/forestry/cpu028

Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A. R., & Cao, X. (2014). Biochar-supported zerovalent iron reclaims silver from aqueous solution to form antimicrobial nanocomposite. *Chemosphere*, *117*, 801–805. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2014.10.057

Zoroufchi Benis, K., Minaei, S., Soltan, J., & McPhedran, K. N. (2022). Adsorption of lincomycin on microwave activated biochar: batch and dynamic adsorption. *Chemical Engineering Research and Design*, *187*, 140–150. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.058