

Desenvolvimento da Pesquisa e Tendências para a Utilização do Biochar no Brasil: uma Revisão sistemática

Carlos Eduardo M. de Oliveria¹

 orcid.org/0000-0001-8870-6937

Thiago de Sá Sena⁴

 orcid.org/0000-0003-1593-3439

Arthur Allyson de Lima Oliveira²

 orcid.org/0009-0007-2759-731X

Daniela Lima Machado da Silva³

 orcid.org/0000-0001-8994-9631

¹Universidade Federal do Ceará, Russas, Brasil. E-mail: edu.machado@alu.ufc.br

²Universidade Federal do Ceará, Russas, Brasil.

³Universidade Federal do Ceará, Russas, Brasil.

⁴Universidade Federal do Ceará, Russas, Brasil.

DOI: 10.25286/rep.v10i3.3520

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Como citar este artigo pela NBR 6023/2018: Carlos Eduardo M. de Oliveria; Arthur Allyson de Lima Oliveira; Daniela Lima Machado da Silva. Thiago de Sá Sena⁴. Desenvolvimento da Pesquisa e Tendências para a Utilização do Biochar no Brasil: uma Revisão sistemática. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v.10, n. 3, p. 33-42, 2025.

RESUMO

O presente estudo apresenta uma revisão sistemática sobre a produção, utilização e perspectivas do biochar no Brasil, abrangendo o período de 2010 a 2024. Foram selecionados 228 artigos a partir das bases Web of Science (WoS) e Scopus, utilizando critérios de inclusão e exclusão alinhados ao objetivo da pesquisa. As pesquisas relacionadas ao *biochar* no Brasil tem ganhado um significativo destaque nos últimos anos, com registros indicando seu início por volta de 2010. Contudo, em 2011 e 2012, não houve publicações. Desde então, a pesquisa cresceu, atingindo seu ápice em 2021, com 24 artigos publicados. Os trabalhos analisados abordaram a influência de diferentes tipos de biomassas e parâmetros de produção na qualidade do *biochar*, sua aplicação na remoção de poluentes, uso como biocombustível e efeitos positivos em plantas. Observou-se que a pirólise foi o método predominante de produção, embora outros processos, como gaseificação e torrefação, também tenham sido explorados. Apesar dos avanços, ainda há desafios a serem superados para que o *biochar* seja amplamente utilizado no Brasil, sendo a falta de regulamentação específica e de incentivos governamentais um dos principais obstáculos.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; Resíduos; *Biochar*.

ABSTRACT

This study aims to present a comprehensive and updated review of the production, utilization, and future perspectives of biochar in Brazil, covering the period from 2010 to 2024. The research method adopted was a systematic literature review using the Web of Science (WoS) and Scopus databases. For the selection of studies, search criteria were defined in alignment with the study's objective. After applying search filters and inclusion and exclusion criteria, 228 articles were selected. Research on biochar in Brazil has gained significant attention in recent years, with records indicating its emergence around 2010. However, in 2011 and 2012, no publications were identified. Since then, research in this field has expanded, reaching its peak in 2021, with 24 published articles. Despite advancements, challenges remain to be overcome for the widespread adoption of biochar in Brazil, with the lack of specific regulations and government incentives being major obstacles.

KEY-WORDS: Biomass; Residue; *Biochar*.

1 INTRODUÇÃO

Na última década, houve um notável aumento nas taxas de geração de resíduos sólidos, impulsionado pelo intenso processo de urbanização e do crescimento populacional [1]. Segundo dados da *International Solid Waste Association*, a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) aumentará para 3,4 bilhões de toneladas em 2050, sendo o Brasil o maior produtor de RSU da América Latina e Caribe. Esse cenário, aliado à complexidade da gestão de resíduos, tem ocasionado dois grandes problemas para o desenvolvimento sustentável: o constante crescimento de déficits energéticos e o agravamento da poluição ambiental [2].

O déficit energético, resultante do consumo exacerbado de energia, aliado à redução das reservas de combustíveis fósseis representa uma ameaça à estabilidade energética global. Paralelamente, a poluição ambiental está deteriorando a qualidade do ar, da água e do solo, colocando em risco a biodiversidade e a saúde humana [3]. Diante desse contexto, urge o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis e ecológicas que possibilitem solucionar estas questões críticas. O biochar, material derivado de resíduos de biomassa, surge como uma das alternativas para mitigar as questões energéticas, purificação de água, remediação ambiental [4] e ganho de créditos de carbono. Além disso, a produção desse material está alinhada com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) [5].

O *biochar* é um material renovável e rico em carbono produzido por processo termoquímico, como a pirólise e carbonização hidrotérmica de biomassa em ambiente com restrição de oxigênio [3]. Esse material pode ser obtido a partir de diversas fontes residuais, incluindo resíduos agrícolas, de silvicultura, lenhosos, de estações de tratamentos de esgoto, entre outros [6, 7]. A diversidade de matérias-primas e os diversos métodos de preparo resultam em produtos com diferentes características que, pelo baixo custo de produção e propriedades, possuem incontáveis aplicações em diferentes áreas de conhecimentos, como engenharias, química, agrícola, operações industriais e transporte, novas tecnologias e saúde [8].

Inicialmente, as investigações envolvendo o biochar eram voltadas para a aplicação apenas como alternativa para melhorar a fertilização do solo, visando aumentar sua capacidade de retenção

de nutrientes e sequestro de carbono [9]. Contudo, as pesquisas mais recentes têm mostrado novas perspectivas para seu aproveitamento em outros campos de investigação, tais como na conversão e armazenamento de energia, no tratamento de águas, remediação ambiental e na mitigação das mudanças climáticas [10, 11]. Com isso, nas últimas décadas, tem crescido o interesse e estudos a respeito do biochar, tendo em vista seus múltiplos benefícios e diversificado potencial de aplicação.

Embora existam pesquisas sobre o biochar no Brasil, observa-se que a maioria dos trabalhos se concentra em aspectos específicos, como o uso na agricultura [12,13], propriedades químicas e aplicações pontuais [14], bem como na aplicação de biomassa específica [15], o que limita a compreensão ampla do desenvolvimento científico e tecnológico relacionado ao biochar no país. Diante disso, percebe-se uma lacuna de estudos que contemple, de maneira integrada, o panorama completo do crescimento científico e tecnológico do biochar no Brasil.

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão abrangente e atualizada sobre o biochar no Brasil, abrangendo sua produção, utilização e perspectivas futuras, contemplando um lapso temporal de 14 anos (2010 a 2024).

2 METODOLOGIA

O estudo foi baseado em uma revisão sistemática da literatura, considerando artigos brasileiros publicados entre 2010 e 2024 sobre biochar. As bases de dados selecionadas considerando sua relevância e abrangência. Foram aplicados filtros que excluíram artigos de conferência, revisões e capítulos de livros, focando em artigos de periódicos científicos. Além disso, a busca foi restringida a publicações em inglês e originadas no Brasil, resultando em 228 artigos após a remoção de duplicatas.

2.1 BASES DE DADOS

O método de pesquisa adotado neste trabalho foi a revisão sistemática da literatura. Para isso, a seleção e agregação dos artigos relacionados ao tema proposto, foram feitas utilizando duas bases de dados, sendo elas: *Web of Science (WoS)* e *Scopus*, nas quais, é possível encontrar estudos relevantes e atualizados sobre o tema de interesse. Além disso, essas bases de dados oferecem

recursos avançados de pesquisa que permitem filtrar os resultados conforme critérios específicos, como ano de publicação, idioma, países de publicação e tipo de publicação. Esses recursos facilitam a seleção de estudos relevantes, conferindo maior credibilidade e confiabilidade à revisão bibliográfica. Esses fatores foram determinantes na escolha das bases de dados para este estudo.

2.2 DEFINIÇÃO DOS TERMOS DE BUSCA E CRITÉRIOS DE INCLUSÃO

No início da busca, foi definido um conjunto de caracteres (*strings*), assim como aspas e operadores booleanos (*AND*, *OR*, *NOT*) para garantir que a pesquisa ocorresse na ordem, sequência e completude desejada. Assim, os termos de busca iniciais estabelecidos foram: "*Biomass*" *AND* "*Waste*" *AND* "*Biochar*". Com a aplicação desses termos de busca, foram encontrados 9.232 artigos, sendo 4.096 na *Scopus* e 5.136 na *WoS*.

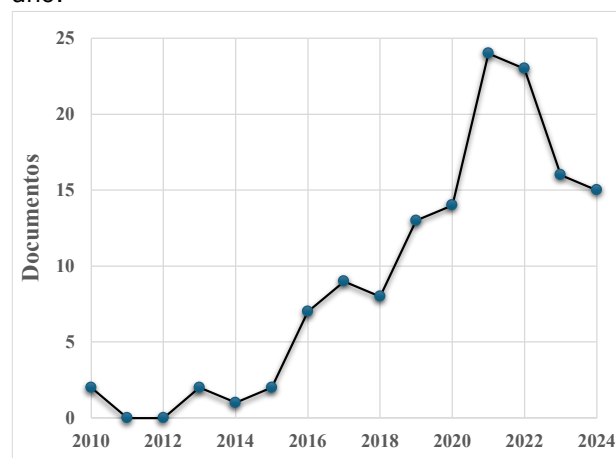
Após a busca inicial, foram aplicados alguns filtros com o intuito de garantir a qualidade dos dados coletados, permitindo a exclusão de informações imprecisas, obsoleta e irrelevantes para este estudo. Para as duas bases, foi aplicado um filtro do tipo de documento, mantendo apenas os artigos de periódicos e excluindo artigos de conferência, acesso antecipado, artigo de revisão e capítulos de livros. A aplicação desse filtro resultou em 7.511 artigos. Para refinar ainda mais os resultados e torná-los mais relevantes para o objetivo do estudo, em ambas as bases foi restringindo os resultados utilizando o filtro de países, o qual focou apenas em artigos provenientes do Brasil, e o filtro de linguagem, focando apenas em artigos publicados em inglês. Isso resultou em 319 artigos. Após a remoção dos artigos duplicados, chegou-se a um resultado de 228 artigos.

3 BIOCHAR NO BRASIL

As pesquisas relacionadas ao biochar no Brasil têm ganhado um grande destaque nos últimos anos, com um marco significativo em 2010, com os estudos de [16] sobre a pirólise da biomassa de salgueiro (*Salix*), miscanthus (*Giganteus*) e pinheiro (*Pinus sylvestris*) e a caracterização dos *biochars* formados, e o de [17], sobre a avaliação da utilização do biochar, produzido pela pirólise lenta da biomassa de *Eucalyptus grandis*, como agente de volume para compostagem de dejetos de aves.

No entanto, nos anos de 2011 e 2012, não foram identificadas publicações brasileiras relacionadas ao biochar, como demonstrado no gráfico da Figura 1. O interesse na pesquisa sobre o biochar no Brasil foi retomado em 2013, com os estudos de [18] que investigaram a caracterização e o potencial de aplicação de biochar derivado de casca de aveia e casca de pinheiro na imobilização de enzimas. Além disso, [19] exploraram o efeito da matriz no desempenho do método de microextração em fase sólida para análise de compostos orgânicos voláteis (COVs) em amostras ambientais.

Figura 1- Gráfico da quantidade de publicação por ano.



Fonte: Autor (2024).

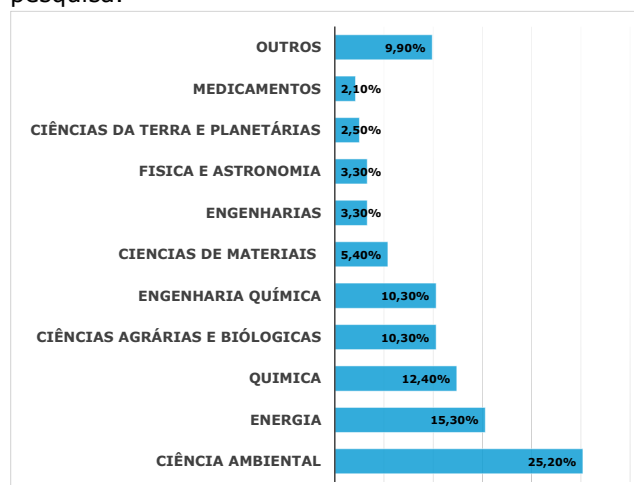
Desde então, a pesquisa sobre biochar no Brasil tem experimentado um crescimento, alcançando seu ápice em 2021, o ano com o maior número de publicações sobre o tema, totalizando 24 artigos. Este aumento notável em 2021 pode ser atribuído ao renovado interesse e ao reconhecimento da importância do biochar para a agricultura sustentável, a remediação ambiental e a mitigação das mudanças climáticas. Os estudos publicados nesse período abrangem uma ampla gama de tópicos, incluindo a influência de diferentes tipos de biomassas e das variáveis envolvidas no processo de produção do biochar, como explorado por [20] em seu estudo sobre a produção e caracterização do biochar obtido a partir de diferentes biomassas e temperaturas de pirólise.

Além disso, abordaram a remoção de poluentes, como estudado por [21] ao investigarem o uso do biochar derivado do endocarpo da palma (*Elaeis guineenses*) para a remoção de azul de metileno, e por [22] em seu estudo sobre a remoção de atrazina utilizando biochar derivado do endocarpo de macaúba (*Acrocomia aculeata*). Também foram

examinadas aplicações de hidrólise para o aprimoramento do biochar, comparando-o com o processo original, conforme investigado por [23] em seu estudo comparativo entre a pirólise de resíduos brutos e hidrolisados de baru (*Dipteryx alata* Vog).

Nos últimos 14 anos, as pesquisas sobre biochar têm adotado uma abordagem multiprofissional, abrangendo diversas disciplinas como ciências ambientais, geração de energia, química, ciências agrárias e biológicas, e outras áreas afins, conforme Figura 2. Essa abordagem integrada tem permitido avanços na compreensão e aplicação do biochar em diversos contextos científicos e tecnológicos.

Figura 2 – Distribuição de artigos por área de pesquisa.



Fonte: Autor (2024).

Nas áreas de ciências ambientais e de química, o foco tem sido na avaliação do impacto do biochar na qualidade do solo. Os estudos de [16], [24], e [25] investigaram a aplicação do biochar como fertilizante e melhorador do solo bem como sua utilização nos setores agrônomo e ambiental. Além disso, pesquisas têm demonstrado a capacidade do biochar em remover poluentes. Os trabalhos de [26], [27], [28] e [29] destacam o uso do biochar como adsorvente para remoção de diuron, poluentes orgânicos, corante rodamina B e azul de metileno, respectivamente.

Em geração de energia, os estudos se concentram na utilização e na otimização do biochar como biocombustível. [30] investigaram o uso de catalisadores heterogêneos, especificamente CaO em matriz de biochar (CaO/Biochar), para produção de biodiesel. [31] analisou os efeitos da temperatura de pirólise na produção de biochar e biometano. [32], concentrou-se na aplicação de biochar derivados de resíduos agrícolas como fonte

de energia em alto-forno. [33] exploraram a utilização do biochar proveniente de resíduos de algodão para a produção de bio-óleo e biochar. E [34], por sua vez, utilizou a produção de biochar e bio-óleo a partir de lodo de esgoto primário, secundário e terciário.

Já na área de ciências agrárias e biológicas, os estudos têm se concentrado nas evidências bioquímicas, fisiológicas e nutricionais positivas do uso de biochar no crescimento de plantas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*) [35] Estudos sobre a utilização do biochar de resíduos de açaí (*Euterpe oleracea*) na mitigação dos efeitos nocivos da seca em plantações de soja [36]. Investigar o efeito do biochar de lodo de esgoto e casca de coco na disponibilidade de nitrogênio e fósforo e como isso afeta a nutrição em plantação de milho [37]. E estudo que focam na caracterização elementar, química e energética de resíduos de dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) [38], e de castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) [39].

4 PRODUÇÃO DE BIOCHAR NO BRASIL

A decomposição termoquímica da biomassa é uma tecnologia de processamento essencial para a produção de biochar, ocorrendo em temperaturas variando de 400 °C a 900 °C [40–42]. Os principais processos de produção de biochar incluem a pirólise, torrefação, combustão, carbonatação e gaseificação. No Brasil, as pesquisas têm se concentrado predominantemente no processo de pirólise, devido à sua eficiência na produção do biochar com alto teor de carbono fixo. Contudo, há estudos que exploram outros métodos de conversão, como o estudo de [43] que investigaram e focaram no processo de gaseificação para a produção de biochar a partir de resíduos provenientes do processamento do açaí (*Euterpe oleracea* Mart). Este estudo destacou o potencial dos resíduos de açaí, um subproduto abundante e subutilizado na região amazônica, como uma fonte viável de biochar através da gaseificação.

Além disso [44] estudaram a co-liquefação hidrotérmica de microalgas, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de cervejaria e lodo de uma fábrica de reciclagem de papel, avaliando o rendimento de biocrude e biochar. Este estudo tem grande destaque no cenário brasileiro por explorar a co-liquefação de diferentes tipos de biomassa, demonstrando a variedade de matéria-prima disponível na região brasileira e a versatilidade do

processo hidrotérmico e seu potencial para maximizar a produção de biochar e outros produtos de valor agregado.

Outro estudo notável utilizando outros processos de conversão é o [45], que propuseram um processo de otimização aplicado a torrefação de semente de pequi, focando na qualidade do biochar e no seu potencial de retenção de $\text{CO}_2(\text{S}_2)$. Este estudo é particularmente interessante devido ao enfoque na otimização das condições operacionais da torrefação visando o melhoramento das propriedades do biochar, e da capacidade da pesquisa em priorizar a qualidade do biochar enquanto avalia simultaneamente a eficiência do processo e o potencial de retenção de $\text{CO}_2(\text{S}_2)$.

Já no que diz respeito às matérias-primas, as pesquisas no Brasil têm explorado a produção de biochar utilizando uma ampla gama de resíduos, abrangendo desde resíduos gerados pela agricultura até resíduos animais. Essa abordagem reflete a diversidade de recursos naturais presentes nos setores agrícola e ambiental brasileiro. Entre essa variedade de materiais, destacam-se como foco de pesquisas as aparas de grama (*Zoysia tenuifolia*), sementes de urucum (*Bixa orellana*), palha de soja (*Glycine max*), palha e sabugo de milho (*Zea mays*), casca de arroz (*Oryza sativa*), casca de café (*Coffea canephora*), casca de tamarindo (*Tamarindus indica*), casca de maracujá (*Passiflora edulis*), casca de laranja (*Citrus sinensis*), casca de abacaxi (*Ananas comosus*), casca de cacau (*Theobroma cacao*), casca de mandioca (*Manihot esculenta*), bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), serragem mista, serragem de garapeira (*Apuleia leiocarpa*), serragem de cabreúva (*Myroxylon peruiferum*), lascas de eucalipto (*Eucalyptus sp.*), pó de coco (*Cocos nucifera*), esterco bovino, sementes de algodão, cama de aves dentre outras matérias-primas [25, 31, 46–49].

5 PERSPECTIVAS FUTURAS DO BIOCHAR NO BRASIL

Em consideração as discussões expostas, é possível entender que avanço da pesquisa sobre o biochar no Brasil depende da integração de esforços científicos, tecnológicos e políticos. Dessa forma, novos estudos, especificamente no Brasil, podem abranger áreas diversas que proporcionem uma melhor compreensão dos benefícios e desafios do biochar, facilitando sua adoção ampla e sustentável no país.

À medida que as pesquisas no tema continuam avançando, estudos futuros têm o potencial de transformar o biochar em uma ferramenta vital para a agricultura sustentável. Por conta disso, o desenvolvimento de tecnologias de produção é essencial. Melhorar a eficiência e a sustentabilidade dos processos de produção de biochar, como a otimização dos métodos de pirólise, pode reduzir os custos e aumentar a qualidade do produto. Além disso, explorar o uso de resíduos agrícolas e urbanos como matéria-prima pode promover uma economia circular.

Outra área promissora é a avaliação dos impactos de longo prazo da aplicação de biochar nos solos brasileiros. Assim, estudos de longa duração, podem ser importantes para compreender como o biochar se comporta no solo ao longo dos anos, incluindo sua persistência, interações com microrganismos e efeitos em diferentes tipos de solo. Também, a integração do biochar com práticas agrícolas sustentáveis pode ser uma área importante para futuras pesquisas, investigando principalmente combinações do biochar com compostagem, adubação verde e os seus benefícios agrônômicos e ambientais.

Em uma perspectiva de viabilidade econômica, são necessários novos estudos para avaliar o uso do biochar em diferentes contextos agrícolas, analisando os seus custos e benefícios econômicos, considerando variáveis como tipos de cultura, práticas de manejo e escalas de produção, que podem fornecer recomendações práticas aos agricultores, incentivando sua adoção.

Além disso, o desenvolvimento de normas e regulamentações baseadas em uma sólida base científica é crucial. Pesquisas que forneçam dados robustos podem apoiar a criação de normas técnicas e regulamentações, evidenciando os benefícios socioeconômicos e ambientais do biochar. Essas informações são fundamentais para os formuladores de políticas que, atrelado a incentivos governamentais e políticas públicas podem trazer resultados promissores no contexto brasileiro para superar os desafios atuais.

6 CONCLUSÕES

A pesquisa sobre o biochar no Brasil avançou significativamente nos últimos 14 anos, evidenciando não apenas seu potencial agrônômico, mas também sua versatilidade em diferentes setores. Estudos analisados mostram que o biochar pode melhorar a capacidade de

retenção de água dos solos, aumentar a disponibilidade de nutrientes e promover um crescimento mais saudável das plantas. Além disso, seu potencial para sequestro de carbono representa uma importante estratégia para mitigar as mudanças climáticas.

Entretanto, apesar dos progressos, observa-se que a maioria dos estudos ainda se concentra em aspectos específicos, como aplicações agrícolas, propriedades químicas isoladas e uso específico de determinadas biomassas. Essa fragmentação limita a compreensão ampla do desenvolvimento científico e tecnológico do biochar no país.

Este estudo evidencia a necessidade de abordagens mais amplas e interdisciplinares, capazes de explorar o biochar como tecnologia inovadora para a valorização de resíduos e sua aplicação em múltiplos setores, incluindo agricultura, energia, tratamento de efluentes e novos materiais. Assim, reforça-se que o potencial inovador do biochar no Brasil depende não apenas do avanço científico, mas também da criação de políticas públicas, regulamentações específicas e incentivos que viabilizem sua adoção em larga escala.

REFERÊNCIAS

- [1] Prajapati, K.K., Yadav, M., Singh, R.M., Parikh, P., Pareek, N., Vivekanand, V.: An overview of municipal solid waste management in Jaipur city, India - Current status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 152, 111703 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111703>.
- [2] Yuan, X., Cao, Y., Li, J., Patel, A.K., Dong, C. Di, Jin, X., Gu, C., Yip, A.C.K., Tsang, D.C.W., Ok, Y.S.: Recent advancements and challenges in emerging applications of biochar-based catalysts. *Biotechnol Adv*. 67, 108181 (2023). <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2023.108181>.
- [3] Yameen, M.Z., Naqvi, S.R., Juchelková, D. et al. Harnessing the power of functionalized biochar: progress, challenges, and future perspectives in energy, water treatment, and environmental sustainability. *Biochar* 6, 25 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00316-3>.
- [4] Tiwari, S.K., Bystrzejewski, M., De Adhikari, A., Huczko, A., Wang, N.: Methods for the conversion of biomass waste into value-added carbon nanomaterials: Recent progress and applications. *Prog Energy Combust Sci*. 92, 101023 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2022.101023>.
- [5] Rex, P., Mohammed Ismail, K.R., Meenakshisundaram, N., Barmavatu, P., Sai Bharadwaj, A.V.S.L.: Agricultural Biomass Waste to Biochar: A Review on Biochar Applications Using Machine Learning Approach and Circular Economy. *ChemEngineering* 2023, Vol. 7, Page 50. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>.
- [6] Kuryntseva, P.; Karamova, K.; Galitskaya, P.; Selivanovskaya, S.; Evtugyn, G. Biochar Functions in Soil Depending on Feedstock and Pyrolyzation Properties with Particular Emphasis on Biological Properties. *Agriculture* 2023, 13, 2003. <https://doi.org/10.3390/agriculture13102003>.
- [7] Wang, Y., Chen, L., Zhu, Y., Fang, W., Tan, Y., He, Z., Liao, H.: Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment: a scientometric review. *Environmental Sciences Europe* 2024 36:1. 36, 1–17 (2024). <https://doi.org/10.1186/S12302-024-00859-Z>.
- [8] da Silva Santos, D.H., Paulino, J.C.P.L., dos Santos Alves, G.F. et al. Effluent treatment using activated carbon adsorbents: a bibliometric analysis of recent literature. *Environ Sci Pollut Res* 28, 32224–32235 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14267-w>.
- [9] He, H., Zhang, R., Zhang, P., Wang, P., Chen, N., Qian, B., Zhang, L., Yu, J., Dai, B.: Functional Carbon from Nature: Biomass-Derived Carbon Materials and the Recent Progress of Their Applications. *Advanced*

Science. 10, 2205557 (2023).
<https://doi.org/10.1002/ADVS.202205557>.

[10] Feng, Y., Jiang, J., Xu, Y., Wang, S., An, W., Chai, Q., Prova, U.H., Wang, C., Huang, G.: Biomass derived diverse carbon nanostructure for electrocatalysis, energy conversion and storage. *Carbon N Y.* 211, 118105 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118105>.

[11] Yang, X., He, H., Lv, T., Qiu, J.: Fabrication of biomass-based functional carbon materials for energy conversion and storage. *Materials Science and Engineering: R: Reports.* 154, 100736 (2023).
<https://doi.org/10.1016/J.MSER.2023.100736>.

[12] Novotny, E. H.; Maia, C. M. B. F.; Carvalho, M. T. M.; Madari, B. E. Biochar: carbono pirogênico para uso agrícola – uma revisão crítica. *Rev. Bras. Ci. Solo*, v. 39, p. 321–344, 2015.
<https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140818>.

[13] Arias, C. M.; Simões da Silva, L. F.; Soares, M. R.; Forti, V. A. A bibliometric analysis on the agricultural use of biochar in Brazil from 2003 to 2021: research status and promising raw materials. *Renew. Agric. Food Syst.*, v. 38, e124, 2023.
<https://doi.org/10.1017/S1742170522000412>.

[14] Barbosa, E.D., Melo, R.E. de, Silva, V.P. da, Costa, D.P. da, Souza Júnior, H. de, Alves, M.F. de A.T., Lopes, M.H.L., Martins Filho, A.P., Medeiros, É.V. de, Duda, G.P., Correa, M.M., Silva, M.C. de B., Lima, J.R. de S., Hammecker, C.: Propriedades de biochars e sua eficácia na retenção de fósforo. *Rev. Bras. Geogr. Fís.* 18(1), 456–470 (2025).
<https://doi.org/10.26848/rbqf.v18.1.p456-470>

[15] Barbosa, E.D., Melo, R.E. de, Silva, V.P. da, Costa, D.P. da, Souza Júnior, H. de, Alves, M.F. de A.T., Lopes, M.H.L., Martins Filho, A.P., Medeiros, É.V. de, Duda, G.P., Correa, M.M., Silva, M.C. de B., Lima, J.R. de S., Hammecker, C.: Propriedades de biochars e sua eficácia na retenção de fósforo. *Rev. Bras. Geogr. Fís.* 18(1), 456–470 (2025).

<https://doi.org/10.26848/rbqf.v18.1.p456-470>.

[17] Dias, B.O., Silva, C.A., Higashikawa, F.S., Roig, A., Sánchez-Monedero, M.A.: Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. *Bioresour Technol.* 101, 1239–1246 (2010).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.024>.

[18] González, M.E., Cea, M., Sangaletti, N., González, A., Toro, C., Diez, M.C., Moreno, N., Querol, X., Navia, R.: Biochar Derived from Agricultural and Forestry Residual Biomass: Characterization and Potential Application for Enzymes Immobilization. *J Biobased Mater Bioenergy.* 7, 724–732 (2013).
<https://doi.org/10.1166/JBMB.2013.1373>.

[19] Higashikawa, F.S., Cayuela, M.L., Roig, A., Silva, C.A., Sánchez-Monedero, M.A.: Matrix effect on the performance of headspace solid phase microextraction method for the analysis of target volatile organic compounds (VOCs) in environmental samples. *Chemosphere.* 93, 2311–2318 (2013).
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.08.023>.

[20] Torchia, D.F.d., Zonta, E., de Andrade, A.M. et al. Production and characterization of biochar obtained from different biomass and pyrolysis temperature. *Braz. J. Chem. Eng.* 39, 415–427 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s43153-021-00147-w>.

[21] Araújo, L.K.F., Albuquerque, A.A., Ramos, W.C.O. et al. Elaeis guineensis-activated carbon for methylene blue removal: adsorption capacity and optimization using CCD-RSM. *Environ Dev Sustain* 23, 11732–11750 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s10668-020-01137-7>.

[22] Vieira, W.T., Bispo, M.D., De Melo Farias, S., De Almeida, A.D.S.V., Da Silva, T.L., Vieira, M.G.A., Soletti, J.I., Balliano, T.L.: Activated carbon from macauba endocarp (*Acrocomia aculeate*) for removal of atrazine: Experimental and theoretical investigation using descriptors based on DFT. *J Environ*

Chem Eng. 9, 105155 (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105155>.

[23] Rambo, M.K.D., Nemet, Y.K.S., Júnior, C.C.S. et al. Comparative study of the products from the pyrolysis of raw and hydrolyzed baru wastes. Biomass Conv. Bioref. 11, 1943–1953 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00585-0>.

[24] Carneiro, J.S. da S., Ribeiro, I.C.A., Nardis, B.O., Barbosa, C.F., Lustosa Filho, J.F., Melo, L.C.A.: Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: Agronomic efficiency and phosphorus availability. Science of The Total Environment. 760, 143955 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143955>.

[25] Otoni, J.P., Matoso, S.C.G., Pérez, X.L.O., da Silva, V.B.: Potential for agronomic and environmental use of biochars derived from different organic waste. J Clean Prod. 449, 141826 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141826>.

[26] Franco, D.S.P., Georgin, J., Ramos, C.G. et al. The production of activated biochar using Calophyllum inophyllum waste biomass and use as an adsorbent for removal of diuron from the water in batch and fixed bed column. Environ Sci Pollut Res 30, 52498–52513 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26048-8>.

[27] Schultz, J., Leal, T.W., Pantano, G., Batista, E.M.C.C., Matos, T.T.S., Munaretto, L.S., de Andrade, J.B., Mangrich, A.S.: Tannin Industry Waste-Derived Porous Carbon: An Effective Adsorbent from Black Wattle Bark for Organic Pollutant Removal. Sustainability (Switzerland). 16, 601 (2024). <https://doi.org/10.3390/su16020601>.

[28] Albanio, I.I., Muraro, P.C.L. & da Silva, W.L. Rhodamine B Dye Adsorption onto Biochar from Olive Biomass Waste. Water Air Soil Pollut 232, 214 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05110-6>.

[29] Santos, K.J.L. dos, dos Santos, G.E. de S., de Sá, Í.M.G.L., Ide, A.H., Duarte, J.L. da

S., de Carvalho, S.H.V., Soletti, J.I., Meili, L.: Biochar de Wodyetia bifurcata para remoção de azul de metileno de matriz aquosa. Tecnologia de recursos biológicos. 293, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122093>.

[30] MELO, Vinícius Mateó e.; FERREIRA, Gabriela Filipini; FREGOLENTE, Leonardo Vasconcelos. Sustainable catalysts for biodiesel production: The potential of CaO supported on sugarcane bagasse biochar. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], v. 189, p. 114042, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114042>.

[31] Souza, P.G.A., do Carmo Lima Carvalho, J., de Souza, L.Z.M. et al. Effect of Pyrolysis Temperature on the Production of Biochar and Biomethanol from Sugarcane Bagasse. Bioenerg. Res. 17, 1394–1401 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10733-8>.

[32] Padilla, E.R.D., Hansted, F.A.S., Luna, C.M.R., de Campos, C.I., Yamaji, F.M.: Biochar derived from agricultural waste and its application as energy source in blast furnace. Renew Energy. 220, 119688 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119688>.

[33] Primaz, C.T., Ribes-Greus, A., Jacques, R.A.: Valorization of cotton residues for production of bio-oil and engineered biochar. Energy. 235, 121363 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121363>.

[34] Menezes, L.N.B., Silveira, E.A., Mazzoni, J.V.S. et al. Alternative valuation pathways for primary, secondary, and tertiary sewage sludge: biochar and bio-oil production for sustainable energy. Biomass Conv. Bioref. (2022). <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02543-9>.

[35] Melo, V.L.M., Gonçalves, M.A.F., Oliveira, V.P., Junior, A.C.R.L., Pereira, R.M., da Silva, B.R.S., Batista, B.L., Nobre, J.R.C., Lobato, A.K.S. (2022) Positive biochemical, physiological and nutritional evidence from the use of biochar in the growth of Eucalyptus plants. Bot Lett 169:337–350.

<https://doi.org/10.1080/23818107.2022.2076258>.

[36] Gonçalves, M.A.F., da Silva, B.R.S., Nobre, J.R.C. et al. Biochar Mitigates the Harmful Effects of Drought in Soybean Through Changes in Leaf Development, Stomatal Regulation, and Gas Exchange. *J Soil Sci Plant Nutr* 24, 1940–1951 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01663-7>.

[37] Gonzaga, M.I.S., de Jesus Santos, J.C., de Almeida, A.Q., da Ros, K., Santos, W.M.: Nitrogen and phosphorus availability in the rhizosphere of maize plants cultivated in biochar amended soil. *Arch Agron Soil Sci.* 68, 1062–1074 (2022). <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1869215>.

[38] Abreu, J.J. da C., Martins, C. da S., Pereira, P.C.G., Bianchi, M.L., Nobre, J.R.C.: Elementary, Chemical and Energy Characterization of “Dende” (*Elaeis guineensis* Jacq.) Waste in the State of Para. *Floresta e Ambiente.* 26, (2019). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043718>.

[39] Leandro, R.I.M., Abreu, J.J. da C., Martins, C. da S., Santos, I.S., Bianchi, M.L., Nobre, J.R.C.: Elementary, Chemical and Energy Characteristics of Brazil Nuts Waste (*Bertholletia excelsa*) in the State of Pará. *Floresta e Ambiente.* (2019). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043618>.

[40] Hadi, P., Xu, M., Ning, C., Sze Ki Lin, C., McKay, G.: A critical review on preparation, characterization and utilization of sludge-derived activated carbons for wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal.* 260, 895–906 (2015). <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2014.08.088>.

[41] Liu, Z., Singer, S., Tong, Y., Kimbell, L., Anderson, E., Hughes, M., Zitomer, D., McNamara, P.: Characteristics and applications of biochars derived from wastewater solids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 90, 650–664 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.02.040>.

[42] Werle, S., Wilk, R.K.: A review of methods for the thermal utilization of sewage

sludge: The Polish perspective. *Renew Energy.* 35, 1914–1919 (2010). <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2010.01.019>.

[43] Pessoa, T.S., Lima Ferreira, L.E. de, da Silva, M.P., Pereira Neto, L.M., Nascimento, B.F. do, Fraga, T.J.M., Jaguaribe, E.F., Cavalcanti, J.V., da Motta Sobrinho, M.A.: Açai waste benefiting by gasification process and its employment in the treatment of synthetic and raw textile wastewater. *J Clean Prod.* 240, 118047 (2019). <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118047>.

[44] Bassoli, S.C., Sanson, A.L., Naves, F.L., Amaral, M. de S.: Hydrothermal co-liquefaction of microalgae, sugarcane bagasse, brewer’s spent grain, and sludge from a paper recycling mill: Modeling and evaluation of biocrude and biochar yield. *J Environ Manage.* 356, 120626 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120626>.

[45] Silveira, E.A., Barcelo, R., Cruz Lamas, G., Paulo de Oliveira Rodrigues, P., Santana Chaves, B., de Paula Protásio, T., Rousset, P., Ghesti, G.: Biofuel from agro-industrial residues as sustainable strategy for CO2 mitigation: Statistical optimization of pequi seeds torrefaction. *Energy Convers Manag.* 304, 118222 (2024). <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2024.118222>.

[46] Gonzaga, M.I.S., Mackowiak, C., de Almeida, A.Q., de Carvalho Junior, J.I.T., Andrade, K.R.: Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrition. *Catena (Amst).* 162, 414–420 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2017.10.018>.

[47] Lazzari, L.K., Neves, R.M., Kerche, E.F., Vanzetto, A.B., Ornaghi, H.L., Zattera, A.J.: Biochar from poultry litter as reinforcement used in epoxy-based composites: mechanical and dynamic mechanical properties. *Polymer Bulletin.* 81, 8823–8838 (2024).

<https://doi.org/10.1007/s00289-023-05128-2>.

[48] Santana, K.V.R., Apolônio, F.C.S.O. & Wisniewski, A. Valorization of cattle manure by thermoconversion process in a rotary kiln reactor to produce environmentally friendly products. *Bioenerg. Res.* 13, 605–617 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10047-0>.

[49] Souza, P.G.A., do Carmo Lima Carvalho, J., de Souza, L.Z.M. et al. Effect of Pyrolysis Temperature on the Production of Biochar and Biomethanol from Sugarcane Bagasse. *Bioenerg. Res.* 17, 1394–1401 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10733-8>.