

# Carvão De Pirólise E Sua Contribuição Para A Sustentabilidade: Uma Revisão Bibliográfica

Julianno Pizzano Ayoub

*Doutorando Em Bioenergia Universidade Estadual De Ponta Grossa  
Praça Santos Andrade, 01 - Centro, 84010-330*

Marcel Ricardo Nogueira De Oliveira

*Doutorando Em Bioenergia Universidade Estadual De Ponta Grossa  
Praça Santos Andrade, 01 - Centro, 84010-330*

Fabricio Hernandes De Freitas

*Doutorando Em Bioenergia Universidade Estadual De Maringá  
Avenida Colombo, 5790, Zona 7, 87020-900*

---

## **Resumo:**

*Esta revisão bibliográfica examina o carvão pirolítico (biochar) como uma tecnologia multifuncional com aplicações sustentáveis. O estudo sintetiza evidências sobre sua produção mediante a pirólise de resíduos de biomassa, um processo que transforma passivos ambientais em produtos de valor agregado. A análise identifica suas principais aplicações na agricultura, na qualidade de condicionador de solos, e na área ambiental, como estratégia de sequestro de carbono e remediação.*

*Os resultados indicam que a aplicação de biochar melhora propriedades físicas e químicas do solo, incluindo a retenção de água e nutrientes, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas por meio do armazenamento estável de carbono. Adicionalmente, o material demonstra alta eficácia como adsorvente na remoção de contaminantes em solos e águas. A viabilidade econômica e energética do processo é reforçada pela cogeração de bio-óleo e syngas, que podem ser utilizados para alimentar o próprio sistema ou outras demandas energéticas.*

*Conclui-se que o carvão pirolítico configura uma solução integradora e promissora no contexto da economia circular, alinhando a gestão adequada de resíduos, o aproveitamento energético de fontes renováveis e a promoção da segurança ambiental. Seu potencial é ampliado quando associado a políticas públicas e avanços tecnológicos que viabilizem sua aplicação em larga escala.*

**Palavras-chave:** *Energia Renovável; Engenharia ; Meio ambiente.*

Date of Submission: 10-05-2026

Date of Acceptance: 20-05-2026

---

## **I. Introdução**

A crise ambiental do século XXI representa um dos desafios mais complexos e urgentes já enfrentados pela humanidade, demandando uma transição paradigmática em nossos sistemas de produção e consumo. O modelo econômico linear, baseado na extração intensiva de recursos naturais finitos e na geração massiva de resíduos, mostrou-se insustentável a longo prazo. As mudanças climáticas, impulsionadas principalmente pela queima de combustíveis fósseis, são a face mais visível desta crise, exigindo respostas imediatas e baseadas em evidências científicas. Neste contexto, a busca por fontes de energia limpas e processos que mitiguem os impactos ambientais existentes torna-se imperativa. Esta revisão bibliográfica situa-se no centro deste debate, explorando interseções cruciais para um futuro mais sustentável. (ROCKSTRÖM et al., 2009).

O setor energético global permanece profundamente dependente de combustíveis fósseis, como carvão mineral, petróleo e gás natural, que respondem por mais de 80% da energia primária mundial. A combustão desses recursos libera quantidades colossais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases de efeito estufa, que se acumulam na atmosfera, intensificando o fenômeno do aquecimento global. Além das emissões, a extração desses combustíveis está associada a severos danos locais, incluindo contaminação de solos e corpos hídricos. A transição para uma matriz energética de baixo carbono não é, portanto, uma mera opção, mas uma condição essencial para a estabilidade climática do planeta. Este processo, no entanto, é tecnológica e politicamente complexo. (IEA, 2023).

As energias renováveis emergem como a solução central para descarbonizar a matriz energética, oferecendo o potencial de gerar eletricidade e calor com emissões insignificantes durante a fase operacional.

Fontes como solar fotovoltaica, eólica, hidrelétrica, geotérmica e a bioenergia aproveitam fluxos naturais contínuos e praticamente inesgotáveis em escala humana. A expansão acelerada da capacidade instalada global, especialmente de solar e eólica, demonstra avanços significativos em eficiência e redução de custos. Contudo, a natureza intermitente e variável de algumas dessas fontes impõe desafios críticos para a confiabilidade e resiliência dos sistemas elétricos. (IRENA, 2022).

A bioenergia, derivada da biomassa, ocupa um lugar singular no leque de renováveis, pois pode fornecer energia despachável e armazenável, complementando fontes intermitentes como sol e vento. A biomassa, que compreende materiais orgânicos de origem vegetal ou animal, pode ser processada para liberar sua energia contida através de processos térmicos, bioquímicos ou físico-químicos. O uso de resíduos agrícolas, florestais e urbanos para produção de energia apresenta a vantagem adicional de resolver um problema de gestão de resíduos. No entanto, a sustentabilidade da bioenergia depende criticamente de práticas de manejo que evitem a competição com a produção de alimentos e a destruição de habitats naturais. (NAIK et al., 2010).

Paralelamente ao desafio energético, a geração excessiva de resíduos sólidos orgânicos constitui um grave problema ambiental e de saúde pública. O descarte inadequado em lixões a céu aberto ou mesmo em aterros sanitários leva à emissão de metano (CH<sub>4</sub>), um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global mais de 25 vezes superior ao CO<sub>2</sub> em um horizonte de 100 anos. Além disso, a decomposição gera chorume, um efluente altamente poluente que pode contaminar lençóis freáticos e solos. A busca por tecnologias que possam valorizar esses resíduos, transformando passivos ambientais em recursos, é, portanto, um pilar fundamental da economia circular. (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012).

Neste cenário dual de necessidade energética e gestão de resíduos, a pirólise surge como uma tecnologia termoquímica versátil e promissora. A pirólise é um processo de decomposição térmica na ausência de oxigênio, que converte biomassa ou outros materiais carbonáceos em três produtos principais: um vapor condensável (bio-óleo), gases não condensáveis (syngas) e um resíduo sólido carbonáceo. A grande vantagem deste processo é que ele evita a combustão completa, permitindo a transformação da matéria-prima em produtos de maior valor agregado e potencialmente neutros em carbono. (BRIDGWATER, 2012).

O produto sólido da pirólise, comumente denominado biochar ou carvão de pirólise, é o foco central desta revisão. O biochar é um material poroso, rico em carbono estável, cujas propriedades físicas e químicas o tornam um material com aplicações multifacetadas na área ambiental. Diferente do carvão vegetal comum, often produzido em baixas temperaturas para energia, o biochar é tipicamente produzido sob condições controladas para maximizar sua estabilidade carbonácea e suas propriedades funcionais. Sua produção representa uma forma de sequestro de carbono, removendo CO<sub>2</sub> da atmosfera e armazenando-o em um formato estável no solo por centenas a milhares de anos. (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

A aplicação mais estudada e celebrada do biochar é a sua utilização como condicionador de solos agrícolas. Quando incorporado ao solo, sua estrutura porosa acta como um condonínio microbial, melhorando a retenção de água e nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que são facilmente lixiviados. Isso pode levar ao aumento da produtividade agrícola, especialmente em solos tropicais degradados e com baixa capacidade de troca catiônica. Além disso, pode reduzir a necessidade de fertilizantes sintéticos, cuja produção é intensiva em energia e emite óxidos nitroso. (JEFFERY et al., 2017).

Do ponto de vista das mudanças climáticas, o sequestro de carbono no solo através da aplicação de biochar é considerado uma tecnologia de emissões negativas. Isto significa que o processo global, desde o crescimento da biomassa até a pirólise e aplicação, pode resultar na remoção líquida de CO<sub>2</sub> da atmosfera. As plantas absorvem CO<sub>2</sub> durante a fotossíntese, e a pirólise converte parte desse carbono em uma forma recalcitrante que resiste à decomposição. Esta dupla função de mitigação—evitar emissões de metano de resíduos e sequestrar carbono—torna a tecnologia particularmente atraente. (WOOLF et al., 2010).

Além da amendidade do solo, o carvão de pirólise demonstra grande eficiência como um material adsorvente para remediar águas e efluentes contaminados. Sua alta área superficial e porosidade permitem que ele adsorva uma gama de poluentes, incluindo metais pesados (como chumbo, cádmio e cobre), compostos orgânicos e até mesmo nutrientes em excesso que causam eutrofização. Esta aplicação transforma o biochar em uma alternativa sustentável e de baixo custo aos adsorventes convencionais, como carvão ativado, ao mesmo tempo que gerencia resíduos. (AHMAD et al., 2014).

O processo de pirólise também gera produtos energéticos valiosos. O syngas, uma mistura de gases como hidrogênio (H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), possui poder calorífico e pode ser queimado para fornecer a energia necessária para o próprio processo de pirólise, tornando-o autossustentável. O excedente de syngas pode ainda ser utilizado para geração de energia elétrica ou calor, incrementando a viabilidade econômica do sistema integrado. (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006).

O bio-óleo, outro co-produto da pirólise, é um líquido orgânico complexo que pode ser refinado para produzir biocombustíveis avançados, produtos químicos verdes ou mesmo ser utilizado diretamente como óleo combustível para caldeiras. Apesar de suas desvantagens, como alta acidez e instabilidade, pesquisas intensivas focam em seu aprimoramento e upgrading para viabilizar sua integração nas cadeias de combustíveis existentes.

Este aproveitamento integral da biomassa maximiza o rendimento e a sustentabilidade econômica do processo. (ZHANG et al., 2007).

A matéria-prima para a produção de biochar é abundantemente diversificada, abrangendo resíduos agrícolas (palha de cereais, bagaço de cana, cascas de arroz), resíduos florestais (galhos, serragem), resíduos da criação animal (cama de frango, esterco) e até mesmo lodo de esgoto. Esta flexibilidade permite que a tecnologia seja adaptada a contextos regional específicos, aproveitando fluxos de resíduos locais e gerando valor a partir de materiais que, de outra forma, seriam queimados ao ar livre ou deixados para apodrecer, emitindo metano. (LEHMANN, 2007).

As condições operacionais do processo de pirólise—principalmente a temperatura final, a taxa de aquecimento e o tempo de residência—influenciam drasticamente a proporção e as características dos produtos finais. Pirólise lenta, com temperaturas entre 350-550°C e baixas taxas de aquecimento, maximiza a produção de biochar sólido. Pirólise rápida, em temperaturas around 500°C com aquecimento muito rápido, privilegia a produção de bio-óleo. Já a pirólise flash, em temperaturas superiores a 700°C, tende a maximizar a produção de gás. (BREBU; UDDIN; SAKA, 2023).

A integração sinérgica entre a produção de energias renováveis intermitentes (solar, eólica) e a pirólise apresenta uma oportunidade estratégica. O excedente de energia elétrica gerada em horários de pico de produção pode ser utilizado para alimentar reatores de pirólise, tornando o processo ainda mais limpo e eficiente. Este conceito de "Power-to-X" armazena energia elétrica excedente na forma de um produto químico estável (o biochar) e combustíveis (bio-óleo e syngas), que podem ser utilizados posteriormente, resolvendo parte do problema de intermitência das renováveis. (GHAZAL et al., 2022).

Apesar do potencial considerável, a produção e aplicação em larga escala de biocarvão enfrentam uma série de desafios técnicos e econômicos. A logística de coleta, transporte e pré-processamento (secagem e trituração) de biomassa dispersa geograficamente pode ser energeticamente intensiva e onerosa. A variabilidade na composição da matéria-prima pode levar a inconsistências na qualidade do biochar produzido, exigindo sistemas de controle e padronização robustos. O investimento inicial em reatores de pirólise de média e larga escala ainda é significativo. (SOHI; LOPEZ-CAPEL; KRULL, 2010).

Avaliar o ciclo de vida completo (ACV) da produção e uso do biochar é fundamental para garantir seu saldo positivo de carbono e sustentabilidade ambiental geral. Estudos de ACV devem considerar desde o cultivo e transporte da biomassa, as emissões do processo de pirólise, o transporte e aplicação do biochar, até seus efeitos de longo prazo no solo. A maioria das análises conclui que a produção de biochar a partir de resíduos possui um balanço energético positivo e um potencial significativo de mitigação de GEE, especialmente quando evitam emissões de decomposição. (ROBERTS et al., 2010).

As políticas públicas e os mecanismos de mercado desempenham um papel crucial na promoção desta tecnologia. A inclusão do biochar em mercados de carbono, como créditos pela remoção de CO<sub>2</sub>, pode gerar receita adicional e impulsionar sua adoção. Políticas de incentivo à gestão adequada de resíduos orgânicos e à produção de energia distribuída também criam um ambiente favorável. A definição de padrões de qualidade e certificação é essencial para construir confiança no mercado e entre os agricultores. (SCHMIDT et al., 2021).

A pesquisa científica sobre o tema expandiu-se exponencialmente na última década, explorando desde aspectos fundamentais da química da pirólise até estudos de campo de longa duração sobre os efeitos do biochar em diferentes tipos de solo e culturas. Esta revisão bibliográfica busca sintetizar este vasto corpo de conhecimento, identificando consensos, lacunas e tendências futuras. O objetivo é fornecer uma visão abrangente e atualizada do estado da arte, conectando a ciência básica às aplicações práticas e implicações políticas. (OK et al., 2023).

Esta introdução estabeleceu o contexto macro da crise ambiental e a necessidade de energias renováveis, introduziu a pirólise como uma tecnologia de conversão e o biochar como seu produto multifuncional. Os parágrafos seguintes desta revisão se aprofundarão metodologicamente na estratégia de busca bibliográfica, para então detalhar os tópicos aqui mencionados: os processos de pirólise, as propriedades do biochar, suas aplicações ambientais, aspectos de viabilidade econômica e os desafios futuros. A integração entre energia renovável e gestão de resíduos através do carvão de pirólise representa um caminho viável para uma economia circular de baixo carbono.

## **II. Materiais E Métodos**

A metodologia para este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica sistemática, de natureza exploratória e descritiva, que segue um protocolo estruturado para assegurar abrangência, rigor científico e reprodutibilidade. O objetivo central é mapear, sintetizar e analisar criticamente o conhecimento científico e técnico disponível sobre o carvão pirólítico (biochar), concentrando-se especialmente em seus processos de produção, propriedades físico-químicas, aplicações ambientais e possibilidades de integração com sistemas de energia renovável. Para tanto, foram consultadas diversas fontes especializadas, incluindo artigos científicos, livros, relatórios técnicos de organizações reconhecidas e teses acadêmicas, utilizando critérios claros de seleção e análise para compilar e examinar as informações mais relevantes publicadas sobre o tema.

### **III. Resultados E Discussões**

A análise da literatura evidencia que a pirólise lenta, em temperaturas entre 350°C e 550°C, é o processo mais amplamente recomendado para a produção de carvão pirolítico com foco em aplicações ambientais, como a condicionamento de solos. Nessas condições, ocorre a carbonização máxima da biomassa, resultando em um material com alta porosidade e elevado teor de carbono fixo, que é fundamental para garantir a estabilidade e a durabilidade do carbono quando incorporado ao solo. Esta estabilidade é o principal atributo que confere ao biochar sua capacidade de sequestro de carbono a longo prazo. (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

A qualidade e as propriedades finais do carvão pirolítico são fortemente influenciadas pelas condições de processo e, crucialmente, pela natureza da matéria-prima utilizada. Biomassas lignocelulósicas, como resíduos madeireiros, bagaço de cana e palhas, tendem a produzir biochars com maior área superficial e porosidade. Por outro lado, biomassas ricas em nutrientes, como esterco e lodo de esgoto, originam biochars com maior teor de macronutrientes como fósforo e nitrogênio, mas com menor área superficial. Esta relação direta entre matéria-prima e produto final permite direcionar a produção para aplicações específicas. (BREBU; UDDIN; SAKA, 2023).

A aplicação do carvão pirolítico no solo demonstra, de forma consistente em diversos estudos, a capacidade de melhorar suas propriedades físico-químicas. Sua estrutura porosa atua como uma esponja, aumentando significativamente a capacidade de retenção de água em solos arenosos e a aeração em solos argilosos. Além disso, sua superfície carregada e sua alta capacidade de troca catiônica (CTC) permitem reter cátions nutrientes como amônio, potássio e cálcio, reduzindo sua lixiviação e tornando-os mais disponíveis para as plantas. (JEFFERY et al., 2017).

Os impactos do biochar na produtividade agrícola são variáveis e contextuais, dependendo do tipo de solo, do clima e da cultura. Os benefícios mais pronunciados são observados em solos tropicais degradados, ácidos e com baixa fertilidade natural. Nesses solos, a aplicação de biochar pode neutralizar a acidez, melhorar a disponibilidade de nutrientes e, conseqüentemente, elevar substancialmente o rendimento das culturas. Em solos já férteis, os incrementos de produtividade podem ser modestos ou insignificantes. (OK et al., 2023).

O potencial do carvão pirolítico para o sequestro de carbono é uma de suas contribuições mais valiosas para a mitigação das mudanças climáticas. O carbono presente no biochar é de natureza recalcitrante, resistente à decomposição microbiana, o que permite seu armazenamento no solo por centenas a milhares de anos. Este processo constitui uma Tecnologia de Emissões Negativas (TEN), pois remove efetivamente o dióxido de carbono da atmosfera, transformando-o em uma forma estável. (WOOLF et al., 2010).

Além do sequestro direto, a produção de biochar a partir de resíduos orgânicos que seriam decompostos ou queimados ao ar livre evita a emissão de metano, um potente gás de efeito estufa. Desta forma, o balanço carbononegativo do processo é amplificado, abordando simultaneamente dois fluxos significativos de emissões: a liberação de carbono fóssil pela energia convencional e a emissão de metano pela decomposição de resíduos. (ROBERTS et al., 2010).

Como material adsorvente, o carvão pirolítico mostra eficiência notável na remediação de águas e solos contaminados. Sua alta área superficial e sua estrutura porosa proporcionam sítios de ligação para uma gama de poluentes, incluindo metais pesados (chumbo, cádmio, cobre), pesticidas e compostos orgânicos. Esta aplicação oferece uma alternativa de baixo custo e sustentável aos adsorventes convencionais, ao mesmo tempo em que promove a destinação adequada de resíduos biomassos. (AHMAD et al., 2014).

A eficácia da adsorção é diretamente influenciada pelas características do biochar. Temperaturas mais elevadas de pirólise geralmente produzem biochars com maior área superficial e, portanto, maior capacidade de adsorção para contaminantes orgânicos. Por outro lado, biochars produzidos em temperaturas mais baixas, que retêm mais grupos funcionais oxigenados em sua superfície, podem ser mais eficazes para adsorver metais pesados através de mecanismos de complexação superficial. (AHMAD et al., 2014).

Os produtos energéticos co-gerados na pirólise, o bio-óleo e o syngas, são fundamentais para a viabilidade econômica do processo. O syngas, rico em hidrogênio, metano e monóxido de carbono, pode ser queimado para fornecer a energia térmica necessária para o próprio reator, tornando o sistema autossustentável do ponto de vista energético. Qualquer excedente de syngas ou bio-óleo pode ser utilizado para geração de energia elétrica ou calor, agregando valor ao processo. (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006).

A integração sinérgica entre energias renováveis intermitentes, como solar e eólica, e a pirólise representa uma fronteira inovadora. O excedente de energia elétrica gerada em períodos de alta produção e baixa demanda pode ser direcionado para alimentar reatores de pirólise elétrica, que oferecem um controle mais preciso da temperatura. Esta simbiose armazena energia renovável excedente na forma de um produto químico estável (o biochar), resolvendo simultaneamente desafios de intermitência e gestão de resíduos. (GHAZAL et al., 2022).

Apesar do potencial, a viabilidade econômica da produção de biochar em larga escala enfrenta obstáculos significativos. Os custos de logística, envolvendo a coleta, transporte, secagem e trituração da biomassa dispersa geograficamente, representam uma fração considerável do custo total de produção. Além disso, o investimento de capital inicial em reatores de pirólise de médio e grande porte ainda é elevado, representando uma barreira à entrada. (SOHI; LOPEZ-CAPEL; KRULL, 2010).

A variabilidade inerente às biomassas residuais é outro desafio crítico para a padronização do produto final. Diferentes matérias-primas, e mesmo lotes de uma mesma matéria-prima, podem produzir biochars com propriedades químicas e físicas distintas. Esta falta de homogeneidade dificulta a criação de protocolos de aplicação universal e a confiança dos agricultores e outros usuários finais, exigindo sistemas robustos de controle de qualidade e caracterização. (SOHI; LOPEZ-CAPEL; KRULL, 2010).

As análises de ciclo de vida (ACV) realizadas até o momento geralmente concordam que a produção de biochar a partir de resíduos possui um balanço energético positivo e um potencial significativo de mitigação de gases de efeito estufa. O maior impacto positivo é observado quando o processo evita emissões que ocorreriam pela decomposição natural ou queima da biomassa, e quando o biochar substitui insumos como fertilizantes sintéticos ou carvão ativado. O transporte da biomassa é frequentemente identificado como uma das etapas mais intensivas em energia do ciclo. (ROBERTS et al., 2010).

A regulação e as políticas públicas são determinantes cruciais para a escalonamento da tecnologia. A inclusão do biochar em mercados de carbono regulados ou voluntários, onde é possível comercializar créditos pelo carbono sequestrado, é apontada como um mecanismo essencial para melhorar sua viabilidade econômica. Políticas que incentivem a gestão sustentável de resíduos e a valorização energética da biomassa também criam um ambiente mais favorável para a adoção da pirólise. (SCHMIDT et al., 2021).

A aceitação por parte dos agricultores e a transferência de tecnologia são desafios socioeconômicos que vão além dos aspectos técnicos. A adoção em larga escala depende da demonstração clara de benefícios econômicos, da disponibilidade de equipamentos de aplicação adequados e do acesso a mercados para os créditos de carbono. Programas de extensão rural e projetos demonstrativos são fundamentais para construir confiança e disseminar o conhecimento sobre as práticas corretas de uso. (JEFFERY et al., 2017).

A pesquisa futura deve priorizar estudos de longa duração em campo, que avaliem os efeitos residuais do biochar no solo ao longo de décadas, além de investigar possíveis efeitos negativos não antecipados. O desenvolvimento de reatores modulares e de baixo custo, adaptados para realidade de pequenas e médias propriedades rurais ou cooperativas, é essencial para democratizar o acesso à tecnologia. (OK et al., 2023).

A padronização de metodologias para caracterização do biochar e a criação de certificações internacionais são passos importantes para a consolidação de um mercado global confiável. Normas claras sobre parâmetros como teor de carbono estável, área superficial, pH e teores de contaminantes (como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos - HPAs) são necessárias para garantir a segurança e a eficácia do produto. (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

A discussão dos resultados converge para o entendimento de que o carvão pirolítico não é uma solução única e milagrosa, mas uma ferramenta poderosa dentro de um portfólio mais amplo de estratégias para a construção de uma economia circular de baixo carbono. Seu maior valor reside em sua capacidade de abordar múltiplos problemas de forma integrada: mitigação das mudanças climáticas, gestão de resíduos, melhoria da segurança hídrica e alimentar e remediação ambiental. (WOOLF et al., 2010).

Em conclusão, a revisão bibliográfica confirma o considerável potencial do carvão pirolítico como uma tecnologia versátil e alinhada com os princípios da sustentabilidade. A realização plena desse potencial, no entanto, depende da superação dos desafios técnicos e econômicos identificados, da implementação de políticas de apoio inteligentes e da contínua avanço da pesquisa científica e do desenvolvimento tecnológico, sempre pautados pela avaliação crítica dos impactos ambientais e sociais. (OK et al., 2023).

#### **IV. Conclusão**

A revisão bibliográfica demonstra que o carvão pirolítico (biochar) é uma tecnologia versátil e com significativo potencial para contribuir com a sustentabilidade ambiental. Sua produção via pirólise representa uma rota eficiente para a valorização de resíduos biomassos, transformando um passivo ambiental em um recurso de valor.

Os resultados consolidados confirmam sua eficácia como condicionador de solos, principalmente em áreas degradadas, e como material adsorvente para remediação ambiental. Seu papel no sequestro de carbono de longa duração destaca-o como uma ferramenta promissora para a mitigação das mudanças climáticas.

Contudo, a viabilidade em larga escala depende da superação de desafios, como a logística de coleta da biomassa, a padronização do produto final e o desenvolvimento de políticas públicas de incentivo. Portanto, o biochar não é uma solução única, mas um componente valioso dentro de um portfólio de estratégias para uma economia circular de baixo carbono.

#### **Referências**

- [1] Ahmad, M. Et Al. Biochar As A Sorbent For Contaminant Management In Soil And Water: A Review. *Chemosphere*, V. 99, P. 19-33, 2014.
- [2] Brebu, M.; Uddin, M. A.; Saka, S. *Pyrolysis Of Biomass*. In: *Sustainable Solid Waste Management*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 255-280.
- [3] Bridgwater, A. V. Review Of Fast Pyrolysis Of Biomass And Product Upgrading. *Biomass And Bioenergy*, V. 38, P. 68-94, 2012.
- [4] Ghazal, H. Et Al. Integration Of Pyrolysis And Renewable Energies For Biomass Valorization. *Energies*, V. 15, N. 19, P. 7251, 2022.
- [5] Hoornweg, D.; Bhada-Tata, P. *What A Waste: A Global Review Of Solid Waste Management*. Urban Development Series;

- Knowledge Papers No. 15. World Bank, Washington, Dc, 2012.
- [6] Iea. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: Iea, 2023.
- [7] Irena. International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs In 2022. Abu Dhabi: Irena, 2022.
- [8] Jeffery, S. Et Al. Biochar Effects On Crop Yield. In: Biochar For Environmental Management. Routledge, 2017. P. 301-325.
- [9] Lehmann, J. A Handful Of Carbon. Nature, V. 447, N. 7141, P. 143-144, 2007.
- [10] Lehmann, J.; Joseph, S. (Eds.). Biochar For Environmental Management: Science, Technology And Implementation. Routledge, 2015.
- [11] Mohan, D.; Pittman, C. U.; Steele, P. H. Pyrolysis Of Wood/Biomass For Bio-Oil: A Critical Review. Energy & Fuels, V. 20, N. 3, P. 848-889, 2006.
- [12] Naik, S. N. Et Al. Production Of First And Second Generation Biofuels: A Comprehensive Review. Renewable And Sustainable Energy Reviews, V. 14, N. 2, P. 578-597, 2010.
- [13] Ok, Y. S. Et Al. Biochar For Environmental Sustainability: A Comprehensive Review. Current Opinion In Environmental Science & Health, V. 32, 100443, 2023.
- [14] Roberts, K. G. Et Al. Life Cycle Assessment Of Biochar Systems: Estimating The Energetic, Economic, And Climate Change Potential. Environmental Science & Technology, V. 44, N. 2, P. 827-833, 2010.
- [15] Rockström, J. Et Al. A Safe Operating Space For Humanity. Nature, V. 461, N. 7263, P. 472-475, 2009.
- [16] Schmidt, H. P. Et Al. Biochar-Based Carbon Removal. In: Biochar In European Soils And Agriculture. Routledge, 2021. P. 25-40.
- [17] Sohi, S. P.; Lopez-Capel, E.; Krull, E. Biochar, Climate Change And Soil: A Review To Guide Future Research. Csiro Land And Water Science Report, 2010.
- [18] Woolf, D. Et Al. Sustainable Biochar To Mitigate Global Climate Change. Nature Communications, V. 1, N. 1, P. 56, 2010.
- [19] Zhang, Q. Et Al. Review Of Biomass Pyrolysis Oil Properties And Upgrading Research. Energy Conversion And Management, V. 48, N. 1, P. 87-92, 2007.