

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Fernando Duarte Prochnow

Biochar: uma revisão bibliográfica dos avanços científicos e industriais, das possibilidades no contexto brasileiro e do seu potencial para o desenvolvimento sustentável

Florianópolis

2023

Fernando Duarte Prochnow

Biochar: uma revisão bibliográfica dos avanços científicos e industriais, das possibilidades no contexto brasileiro e do seu potencial para o desenvolvimento sustentável

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.
Orientador: Matheus Cavali, Me.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra

Duarte Prochnow, Fernando

Biochar: uma revisão bibliográfica dos avanços científicos e industriais, das possibilidades no contexto brasileiro e do seu potencial para o desenvolvimento sustentável / Fernando Duarte Prochnow ; orientador, Matheus Cavali, 2023.

103 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Biochar. 3. Resíduos Agroindustriais. 4. Desenvolvimento Sustentável. 5. Economia circular. I. Cavali, Matheus. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Fernando Duarte Prochnow

Biochar: uma revisão bibliográfica dos avanços científicos e industriais, das possibilidades no contexto brasileiro e do seu potencial para o desenvolvimento sustentável

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 05 de dezembro de 2023.

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Matheus Cavali, Me.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Libardi Junior, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Aline Perin Dresch, Ma.
Avaliadora
Universidade Federal do Paraná

Este trabalho é dedicado à Catarina.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Mariana, minha esposa, por sua presença constante e o apoio incansável, e à pequena Catarina, que carrega consigo a promessa do futuro.

A inspiração que guiou esta pesquisa, o desejo intrínseco de contribuir para a gestão responsável dos resíduos no mundo. Esta missão foi impulsionada por uma visão de um futuro mais sustentável e pela convicção de que cada esforço individual conta para a construção desse cenário.

Agradeço generosidade da família Boff (Pedro, Mari, Bruno e Luigi) que foi sempre receptiva e hospitaleira. E ao casal de amigos Julia e Matheus amigos excepcionais, e ouvintes compassivos das minhas piores piadas.

A Jonathan e Felipe, colegas e padrinhos de casamento, agradeço pela amizade sólida que ultrapassou os limites da sala de aula, enriquecendo também minha vida pessoal.

À minha família — meus pais, Gerson e Lúcia, e minha irmã Heloísa — por compreenderem minhas ausências e aceitaram com paciência o tempo adicional que dediquei a esta fase da vida. E aos meus primos, Beto e Tiago, que ao seguir seus exemplos, guiaram-me ao caminho da universidade.

Ao meu orientador, Matheus Cavali, estendo meu reconhecimento sincero. Suas revisões minuciosas e compreensão do meu ritmo muitas vezes fora do padrão foram cruciais para o aprimoramento deste projeto.

Por último, a Prof. Maria Elisa Magri pela sua escuta atenta e orientação sábia que foram âncoras em tempos difíceis.

Este trabalho não teria sido possível sem o apoio valioso dessas pessoas incríveis. A todos vocês, o meu mais profundo obrigado.

“Não se trata de quão forte você bate, mas de quão forte você pode ser atingido e continuar seguindo em frente.”

(BALBOA, Rocky, 2006)

RESUMO

A poluição ambiental tem sido um assunto de grande interesse tendo em vista que o aumento do consumo e da industrialização tem gerado maior emissão de matéria e energia com efeitos adversos ao meio ambiente. Em relação aos resíduos, eles podem ser identificados como resíduos florestais, de agricultura, provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), resíduos sólidos urbanos e de processamento industrial, podendo ser uma fonte matéria-prima para outros processos, como, por exemplo, a produção de biochar. O biochar é um material carbonáceo produzido a partir carbonização de resíduos orgânicos. Os resíduos são aquecidos a altas temperaturas, resultando na produção de gases, líquidos e um resíduo sólido rico em carbono denominado biochar. Tal processo pode ser uma solução sustentável para o gerenciamento desses resíduos. Nesse sentido, este estudo teve como objetivos (i) verificar os avanços das pesquisas sobre os usos e aplicações do biochar nos últimos 3 a 5 anos, (ii) identificar o cenário de produção industrial de biochar no mundo, buscando as grandes empresas e seus principais mercados, (iii) analisar a disponibilidade de resíduos para a produção e aplicação do biochar no Brasil, e (iv) relacionar as possíveis aplicações do biochar com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os resultados revelam um aumento significativo nas pesquisas sobre biochar a partir do ano de 2020, destacando-se a China e Índia como líderes em publicações acerca do tema. Com relação às indústrias de biochar, a Europa se destaca com 130 empresas e uma produção aproximada de 33.500 toneladas de biochar no ano de 2022. No contexto brasileiro, há um potencial produtivo significativo no setor agropastoril, porém ainda existe mercado para expansão industrial, tendo em vista que a *NetZero* é a única brasileira a explorar esse potencial de produção do biochar, com 4.500 toneladas por ano. Além disso, o biochar contribui para alguns dos ODS, como gestão sustentável da água (ODS 6), transição para energia limpa e renovável (ODS 7), ação contra a mudança global, considerando que o biochar influencia na redução da pegada de carbono e contribuição do biochar para a biodiversidade (ODS 15). Com isso, o biochar emerge como uma promissora solução sustentável no gerenciamento de resíduos, revelando avanços significativos em pesquisas recentes. Ao analisar seu potencial global e o cenário brasileiro, destaca-se a necessidade de expandir a produção industrial para alinhar-se aos ODS, evidenciando seu papel na gestão sustentável da água, transição para energia limpa, ação contra a mudança climática e preservação da biodiversidade.

Palavras-chave: Biochar; Resíduos Agroindustriais; Resíduos de Estação de Tratamento de Esgoto; Resíduos Sólidos Urbanos; Desenvolvimento Sustentável; Economia circular.

ABSTRACT

Environmental pollution has been a subject of great interest, considering that increased consumption and industrialization have led to higher emissions of matter and energy, with adverse effects on the environment. Regarding waste, it can be identified as forest, agricultural, sewage treatment plant (STP) residues, municipal solid waste, and industrial processing residues, serving as a raw material source for other processes, such as biochar production. Biochar is a carbonaceous material produced through the carbonization of organic residues. The residues are heated to high temperatures, resulting in the production of gases, liquids, and a solid carbon-rich residue called biochar. This process can be a sustainable solution for waste management. In this context, this study aimed to (i) assess advances in research on the uses and applications of biochar in the last 3 to 5 years, (ii) identify the industrial biochar production scenario worldwide, focusing on major companies and their main markets, (iii) analyze the availability of residues for biochar production and application in Brazil, and (iv) relate possible biochar applications to the Sustainable Development Goals (SDGs). The results reveal a significant increase in biochar research since 2020, with China and India standing out as leaders in biochar publications. Concerning biochar industries, Europe stands out with 130 companies and a production of around 33,500 tons of biochar in 2022. In the Brazilian context, there is significant production potential in the agropastoral sector, but there is still room for industrial expansion. *NetZero* is the only Brazilian company exploring this biochar production potential, with an annual output of 4,500 tons. Furthermore, biochar contributes to some of the SDGs, such as sustainable water management (SDG 6), transition to clean and renewable energy (SDG 7), action against global climate change, as biochar influences carbon footprint reduction, and contribution to biodiversity preservation (SDG 15). Thus, biochar emerges as a promising sustainable solution in waste management, revealing significant advances in recent research. When analyzing its global potential and the Brazilian scenario, there is a need to expand industrial production to align with the SDGs, highlighting its vital role in sustainable water management, transition to clean energy, action against climate change, and biodiversity preservation.

Keywords: Biochar; Agroindustrial Waste; Sewage Treatment Plant Residues; Municipal Solid Waste; Sustainable Development; Circular Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagens de Microscopia com Íons de Hélio com o biochar de salgueiro proveniente do estudo de Rasa et al. (2018). Tamanho das imagens (a) 1 mm, (b) 50 μm , (c) 4 μm e (d) 2 μm . Na imagem (a) a porosidade geral do biochar é mostrada enquanto a imagem (b) é focada em poros com diâmetro de aprox. 5–10 μm	41
Figura 2 - Rede de palavras-chave com pelo menos 100 ocorrências, relacionadas à produção de biochar.....	48
Figura 3 – Artigos com a palavra-chave “biochar” publicados nos anos de 2019 a setembro de 2023.....	49
Figura 4 - Rede de países que obtiveram mais artigos publicados relacionadas à produção de biochar.....	51
Figura 5 – Exemplos de produção de biochar modificado.....	54
Figura 6 - Acumulado de plantas de produção de biochar na Europa, segundo o Relatório do Mercado Europeu de Biochar.....	66
Figura 7 – Mapa mundial com a capacidade de produção de biochar em toneladas por ano dos países com indústrias produtoras de biochar.....	68
Figura 8 - Tecnologia CarbonFX proprietária da Airex.....	71
Figura 9 – Gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2020.....	78
Figura 10 – Exemplos de telhado verde. A imagem “A” está localizada na cidade de Milwaukee, Wisconsin, United States, com instalação do telhado em maio de 2009. Já a Imagem “B” localiza-se em Pickering, Ontario, Canada, com instalação em julho de 2014.....	84
Figura 11 - Amostras de escoamento de chuva de bandejas provenientes do estudo de Beck, Johnson e Spolek (2011). Foi identificada a diferença de cor entre amostras de escoamento coletadas do controle (amostras 1 a 6), solo biochar (amostras 7 a 11) e água que foi utilizada nos eventos sequenciais de chuva (amostra 12).....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estratégia de busca de acordo com cada matéria-prima (biomassa).....	36
Tabela 2 - Rendimento em biochar a partir de diferentes métodos de produção e resíduos.....	45
Tabela 3 - Quantidade de artigos publicados durante os anos de 2019 e 2023 de acordo com os processos de produção do biochar. Base de dados: <i>Scopus</i>	47
Tabela 4 – Artigos encontrados na estratégia de busca de produção de Biochar de acordo com cada tipo de resíduo e o ano de publicação, durante o período de 2019 a 2023. Base de dados: <i>Scopus</i>	50
Tabela 5 - Artigos encontrados pela estratégia de busca de produção de biochar de acordo com cada tipo de resíduo e o país de publicação. Base de dados: <i>Scopus</i>	53
Tabela 6 - Produção de biochar nos mercados globais de destaque.....	65
Tabela 7 - Compilado de empresas produtoras de biochar, identificando a capacidade de produção anual, a técnica de produção e a matéria-prima utilizada.....	68
Tabela 8 – Estimativa de resíduos gerados a partir de culturas agrícolas mais significativas no contexto brasileiro.....	74
Tabela 9 – Estimativa de resíduos gerados a partir de rebanhos pecuários mais significativas no contexto brasileiro.....	76
Tabela 10 – Compilado de quantidade de resíduos gerados de acordo com o tipo de matéria-prima.....	79
Tabela 11 – Compilado de rendimento de biochar de acordo com o tipo de matéria-prima.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Análise do Ciclo de Vida
ATE	Avaliação Técnico-Econômica
BET	Brunauer-Emmett-Teller
CHT	Carbonização Hidrotérmica
COS	Carbono Orgânico no Solo
EBI	Consórcio Europeu da Indústria de Biochar
ETE	Estações de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
GEE	Gases de Efeito Estufa
HAP's	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
IBGE	Instituto brasileiro de Geografia e Estatística
MMT	Montmorilonita
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RSU-BC	Biochar Proveniente de Resíduo Sólido Urbano
SNIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	JUSTIFICATIVA	18
3	OBJETIVOS	20
3.1	OBJETIVO GERAL.....	20
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DE ARTIGOS	22
4.2	PROCESSAMENTOS DOS DADOS	23
4.3	COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE ARTIGOS POR ANO.....	23
4.4	IDENTIFICAÇÃO DAS EMPRESAS.....	23
4.5	BIOCHAR E SEU POTENCIAL PRODUTIVO NO BRASIL.....	24
4.6	BIOCHAR E OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	25
5	DESENVOLVIMENTO.....	26
5.1	AVANÇOS NAS PESQUISAS SOBRE BIOCHAR.....	26
5.1.1	Processos de produção de biochar	26
5.1.1.1	<i>Pirólise.....</i>	27
5.1.1.2	<i>Gaseificação</i>	28
5.1.1.3	<i>Carbonização hidrotérmica.....</i>	29
5.1.1.4	<i>Torrefação</i>	30
5.1.2	Avanços nas pesquisas.....	32
5.1.3	Processo de ativação e melhoria do biochar.....	39
5.1.3.1	<i>Modificação física</i>	40
5.1.3.2	<i>Modificação química</i>	41
5.1.3.3	<i>Modificação biológica.....</i>	42
5.1.4	Aplicações do biochar nos desafios ambientais.....	43
5.1.4.1	<i>Gerenciamento de resíduos</i>	43

5.1.4.2	<i>Adsorvente de poluentes na água e solo</i>	46
5.1.4.3	<i>Biochar para a produção de energia</i>	47
5.1.4.4	<i>Contribuição do biochar para melhorias de solos</i>	49
5.1.4.5	<i>Biochar e o sequestro de carbono</i>	49
5.2	ESCALA DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE BIOCHAR NO MUNDO	50
5.2.1	Panorama da produção industrial de biochar	50
5.2.2	Indústrias líderes do biochar	53
5.3	POTENCIAL PRODUTIVO DO BIOCHAR NO BRASIL	58
5.4	BIOCHAR E OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS) 67	
5.4.1	Contribuição do biochar para a gestão sustentável da água (ODS 6)	68
5.4.2	Transição para energia limpa e renovável (ODS 7)	71
5.4.3	Redução da pegada de carbono e impactos no ODS 13	72
5.4.4	Contribuição do biochar para a biodiversidade (ODS 15)	73
6	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A	100

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a poluição ambiental tem sido um assunto de grande interesse (SHADDICK et al., 2020). O aumento do consumo e da industrialização tem gerado maior emissão de poluentes, prejudicando o meio ambiente e, conseqüentemente, a saúde humana (LIN; LI, 2020). As emissões antropogênicas de dióxido de carbono (CO₂) aumentaram mais de 3% a cada ano desde 2000, colocando os ecossistemas da Terra em um caminho para mudanças climáticas aceleradas e irreversíveis (RAUPACH et al., 2007). Os gases de efeito estufa (GEE) são prejudiciais devido à sua capacidade de reter calor na atmosfera terrestre, levando ao efeito estufa e ao subsequente aquecimento global (OERTEL et al., 2016). Estratégias de mitigação que removam o CO₂ em excesso da atmosfera assumem uma importância ainda maior do que uma simples redução equivalente nas emissões (WOOLF et al., 2010a).

Com a capacidade de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, o biochar foi identificado como um material rico em carbono apto de reduzir as emissões GEE, especialmente CO₂, óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) (BARRACOSA et al., 2020). Estudos demonstram que o biochar adicionado no solo tem potencial de reduzir as emissões de N₂O e o CH₄ provenientes das práticas agrícolas, contribuindo para a diminuição do impacto dos gases de efeito estufa na agricultura (KAMMANN et al., 2017). A aplicação de biochar em solos agrícolas tem o potencial de sequestrar carbono recalcitrante (composto que persiste por longos períodos no ambiente), aumentar a retenção de nitrogênio e melhorar a capacidade de retenção de água (ZHENG; STEWART; COTRUFO, 2012).

A produção de biochar é sensível a parâmetros específicos que determinam suas propriedades finais (CROMBIE et al., 2015). A temperatura de pirólise, por exemplo, influencia a estabilidade térmica e retenção de nutrientes, enquanto o tempo da pirólise afeta a decomposição da matéria-prima e, conseqüentemente, as características do biochar (XIE et al., 2015). A escolha da matéria-prima é determinante, dada as diferentes composicionais químicas de biomassas distintas que, por conseguinte, afetam as características do biochar (CROMBIE et al., 2015). O processo de produção incluindo a presença de oxigênio durante a pirólise, modifica significativamente as propriedades finais (GHODAKE et al., 2021). A otimização desses fatores é essencial para obter biochars com perfis adequados para aplicações específicas, como, por exemplo, condicionamento do solo, remediação ambiental ou armazenamento de

carbono (WANG; WANG, 2019). Assim, essas particularidades fazem do biochar uma opção promissora para setores como agricultura, reabilitação ambiental e energia sustentável (CAVALI et al., 2022).

A produção de biochar pode derivar a partir de uma variedade de resíduos orgânicos, oferecendo uma solução sustentável para a gestão desses materiais (WOOLF et al., 2010b). Diferentes tipos de resíduos apresentam vantagens e desafios específicos em termos de disponibilidade, custo e potencial econômico na produção de biochar (CAVALI et al., 2022). Resíduos de biomassa florestal, como serragem, galhos, cascas de árvores e tocos, podem ser convertidos em biochar, sendo economicamente viável em regiões com disponibilidade significativa desses resíduos (PARK et al., 2019a). Resíduos de processamento industrial, como remanescentes de papel e plásticos biodegradáveis também podem ser utilizados, proporcionando oportunidades econômicas e reduzindo o impacto ambiental (CHO et al., 2019). O lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) contém material orgânico e nutrientes que podem ser transformados em biochar. Ademais, tal resíduo apresenta desafios econômicos devido aos custos de manuseio, transporte e processamento, além das regulamentações aplicáveis (FAN et al., 2017). A conversão de resíduos sólidos urbanos, como resíduos domésticos e orgânicos em biochar por meio da pirólise, tem sido identificado como uma alternativa para reduzir o uso de recursos não renováveis, como turfa e fibra de coco (MACHADO et al., 2022). Do mesmo modo, a biomassa agropastoril, tal como bagaço da cana, casca de café e esterco de animais, é uma importante fonte de matéria-prima para a produção de biochar, o qual traz benefícios econômicos ao fornecer um produto de valor agregado, facilitando a logística de coleta e processamento (BILLA; ANGWAFO; NGOME, 2019). O Brasil se destaca como um país que possui uma forte base agrícola, sendo um dos maiores produtores e exportadores de *commodities* agrícolas do mundo, gerando uma quantidade significativa de resíduos (TOPIK, 2019). Diante desse contexto, o uso de biomassa agropastoril para a produção de biochar se mostra especialmente relevante no Brasil (GONZAGA; SOUZA; SANTOS, 2021).

Essa diversidade de aplicações ressalta o potencial multifuncional do biochar em abordagens sustentáveis para agricultura, remediação ambiental e gestão de resíduos. Além disso, a diversidade de resíduos orgânicos disponíveis, desde biomassa florestal a resíduos industriais e urbanos, oferece uma solução sustentável para a gestão desses materiais. Assim, o biochar revela-se uma opção multifuncional e promissora para setores como agricultura,

remediação ambiental e gestão de resíduos, contribuindo de maneira significativa para abordagens sustentáveis nesses domínios.

2 JUSTIFICATIVA

O biochar é um sólido rico em carbono obtido da decomposição térmica anaeróbica de biomassa (LEHMANN; GAUNT; RONDON, 2006). Seu uso histórico é evidenciado na China, com achados de cerâmica escura e carvão vegetal (CHEN et al., 2019b), e no Brasil, com a Terra Preta da Bacia Amazônica, nome que deriva do solo negro dos índios (GLASER et al., 2001). A Terra Preta apresenta níveis elevados de componentes orgânicos, nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), resíduos de carbono cerâmico, restos de culturas e ossos de várias espécies, incluindo peixes (SOMBROEK et al., 2002; TENENBAUM, 2009).

As propriedades físico-químicas do biochar sugerem amplas perspectivas de aplicação deste material, além de ser uma alternativa na destinação e resolução dos resíduos sólidos (HU et al., 2021). A produção de biochar, seja através da pirólise, gaseificação ou carbonização hidrotérmica, é um processo complexo envolvendo reações químicas. O tipo de matéria-prima, a tecnologia de produção e as condições do processo definem o rendimento e a qualidade do biochar, regendo, portanto, as suas possíveis aplicações subsequentes (WANG et al., 2020; WANG; WANG, 2019). Nos últimos anos, a produção e aplicação de biochar têm sido amplamente desenvolvidas, despertando interesse de indústrias e centros de pesquisas para aprimorar o processamento e aplicabilidade do biochar (HU et al., 2021). Tecnologias como inteligência artificial e *Machine Learning* têm sido incorporadas para escolher a matéria-prima adequada para uma produção eficaz de biochar e suas possíveis aplicações (KHAN et al., 2022).

Dentre os empregos do biochar, este material pode ser utilizado como um agente para a melhoria de solos. Foi possível identificar, por exemplo, o aumento da fertilidade do solo e da produtividade das plantas, fortalecendo eventualmente a segurança alimentar (AGARWAL et al., 2022; NATH; SARKAR, 2022). A utilização de biochar também pode contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, por meio do sequestro de carbono e da minimização das emissões de GEE (LYU et al., 2022). Além disso, o biochar pode ser utilizado na remediação de contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes no solo, água e ar por meio de processos de adsorção e degradação (GAO et al., 2022; GWENZI et al., 2021; QIU et al., 2022). E considerando seu teor de carbono, o biochar também pode ser empregado como um combustível sólido devido ao seu poder calorífico, para a produção de bioenergia (SADAKA et al., 2014). Vale salientar que os processos de produção de biochar podem concomitantemente gerar outras formas de bioenergia, como bio-óleo e gás de síntese. (OSMAN et al., 2022).

Neste sentido, o amplo potencial de aplicabilidade do biochar e a gestão econômica de resíduos que a tecnologia proporciona contornam a abordagem “produção-utilização-descarte” (modelo econômico linear), possibilitando a reincorporação de resíduos na cadeia econômica e, assim, promovendo uma economia circular. Portanto, essa abordagem contribui para o alcance das metas de emissões GEE, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento sustentável global (HE et al., 2022; QIN et al., 2022; KUMAR; BHATTACHARYA, 2021). Diante disso, estudos que abordem a produção de biochar a partir de uma perspectiva ampla são importantes para o avanço e consolidação da tecnologia dentro da agenda ambiental global. Contudo, para compreender o “estado da arte” deste tema é necessário olhar primeiramente para o domínio acadêmico, uma vez que as pesquisas de base sugerem continuamente possíveis alternativas de produção de biochar. Posteriormente, é importante atentar para a indústria de modo a identificar os processos consolidados no mercado. Por fim, é imprescindível avaliar os efeitos desta prática do ponto de vista econômico, social e ambiental e como ela pode ser replicada em outros cenários.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão de literatura sobre a produção de biochar a partir de resíduos agropastoris, de lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE), de resíduos sólidos urbanos (RSU) e de resíduos industriais, analisando o panorama mundial com foco especial no contexto brasileiro e abordando as possíveis aplicações e benefícios ambientais desse material.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificar os avanços das pesquisas sobre a produção e possíveis aplicações do biochar nos últimos 5 anos. De que maneiras o biochar tem sido proposto como uma solução potencial para os desafios ambientais como, por exemplo, no gerenciamento de resíduos, na remoção de poluentes, na produção de energia, na remediação do solo e no sequestro de carbono?
- b) Detectar a escala de produção industrial de biochar no mundo, buscando as grandes empresas e seus principais mercados. Quais são as principais indústrias produtoras de biochar e onde estão localizadas? Quais são os principais mercados consumidores de biochar e quais são as principais aplicações desse produto nesses mercados?
- c) Identificar o potencial de produção do biochar e suas aplicações no Brasil. Quais são as principais fontes de matérias-primas disponíveis no Brasil para a produção de biochar? Como elas podem ser aproveitadas de forma sustentável para fomentar uma produção em larga escala?
- d) Relacionar o potencial do biochar com os alguns dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Como o biochar pode auxiliar na melhoria da gestão sustentável da água (ODS 6) em áreas propensas a secas, inundações ou escassez hídrica? De que maneira a utilização do biochar pode contribuir para a transição para sistemas de energia limpa e renovável (ODS 7)? Quais são os principais impactos do uso do biochar na

redução da pegada de carbono (ODS 13) de diferentes setores econômicos? Qual é o potencial do uso do biochar na conservação e restauração da biodiversidade (ODS 15)?

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DE ARTIGOS

Para explorar o uso de resíduos para fabricação de biochar, foi realizada uma busca na base de dados *Scopus* por estudos relevantes na temática proposta. O período considerado para a seleção dos artigos foi de 2019 a setembro 2023. A estratégia de busca, exibida na Tabela 1, utilizou palavras-chave específicas para cada categoria de resíduo utilizada na produção de biochar, bem como operadores booleanos.

Para a compreensão clara das matérias-primas (biomassa) utilizadas na produção de biochar, é essencial definir cada categoria de forma sucinta. O resíduo agropastoril refere-se a materiais resultantes das atividades agrícolas e pecuárias, como restos de colheitas, estrume e palha. Exemplos incluem cascas de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e esterco de gado. A matéria-prima florestal engloba resíduos de atividades de manejo florestal, como galhos, folhas e serragem. Efluentes provenientes de ETE compõem a categoria de resíduos provenientes destas instalações, incluindo lodo de esgoto. Os resíduos sólidos urbanos representam materiais descartados nas áreas urbanas, como restos de alimentos, papel. Por fim, os resíduos industriais englobam subprodutos e resíduos de processos industriais, como borras de petróleo e cinzas de combustão.

Tabela 1 - Estratégia de busca de acordo com cada matéria-prima (biomassa).

Matéria-prima (biomassa)	Estratégia de Busca
Resíduos agropastoril	TITLE-ABS-KEY (biochar OR bio-char OR biochars AND crop AND residue OR residues OR waste OR wastes) AND PUBYEAR > 2018
Resíduos florestais	TITLE-ABS-KEY (biochar OR bio-char OR biochars AND forestry AND waste OR wastes OR residues OR residues) AND PUBYEAR > 2018
Resíduos provenientes de ETE	TITLE-ABS-KEY (biochar OR bio-char OR biochars AND sewage) AND PUBYEAR > 2018

Resíduos sólidos urbanos	TITLE-ABS-KEY (biochar OR bio-char OR biochars AND "municipal solid" AND waste OR wastes OR residue OR residues) AND PUBYEAR > 2018
Resíduos industriais	TITLE-ABS-KEY (biochar OR bio-char OR biochars AND industrial AND residue OR waste) AND PUBYEAR > 2018

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 PROCESSAMENTOS DOS DADOS

O software VOSviewer foi utilizado para gerar mapas de densidade colaborativa entre países (apenas países conectados são apresentados) e entre palavras-chave (apenas palavras-chave com pelo menos 100 ocorrências foram incluídas usando a opção “Todas as Palavras-chave”).

4.3 COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE ARTIGOS POR ANO

Com o objetivo de avaliar o panorama das publicações relacionadas ao biochar ao longo de um período de aproximadamente cinco anos, de 2019 ao mês de setembro de 2023, foi utilizada a estratégia de busca “*TITLE-ABS-KEY (biochar OR bio-char OR biochars) AND PUBYEAR > 2018*” na base de dados *Scopus*.

4.4 IDENTIFICAÇÃO DAS EMPRESAS

Para avaliar as empresas produtoras de biochar mais relevantes no cenário mundial, uma busca foi realizada em resumos de relatórios financeiros referentes ao mercado global de biochar. A lista inicial de empresas foi submetida a um processo de refinamento, na qual foi consultado o material disponível no próprio *website* da empresa e foram identificadas aquelas que produzem biochar e que detinham outros dados, como o ano de início das operações, a capacidade de produção anual (ton/ano), a técnica de produção e a matéria-prima utilizada. Foram excluídas as empresas que não possuíam todos os dados de interesse deste estudo, empresas que possuíam produção anual inferior a 200 toneladas por ano e empresas

consideradas fora do escopo do estudo (não produtoras de biochar). Essa etapa resultou em uma lista inicial contendo 40 empresas relevantes no mercado global de biochar (APÊNDICE A).

Posteriormente, os sites das empresas listadas foram minuciosamente examinados para identificar empresas ativas no ano de 2023. Foram selecionadas empresas com capacidade de produção de biochar média (200 – 499 ton/ano), grande (500 - 1.999 ton/ano), muito grande (2.000 ton/ano - 4.999 ton/ano) e industrial (≥ 5.000 ton/ano), segundo a classificação do Relatório de Mercado Europeu de Biochar (EBI, 2023b). A seleção final levou em consideração as empresas que prontamente disponibilizaram os dados necessários para o estudo, seja por meio de seus sites oficiais, apresentações da empresa ou em resposta a consultas diretas via e-mail (totalizando 21 empresas - Tabela 7).

4.5 BIOCHAR E SEU POTENCIAL PRODUTIVO NO BRASIL

Com a finalidade de analisar o potencial de produção brasileiro, foi inicialmente realizada uma busca pelas potenciais matérias-primas para a produção de biochar no Brasil. Inicialmente, para os resíduos agropastoris foi utilizado o relatório atualizado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) referente às produções anuais (IBGE, 2022) e selecionadas as 10 maiores produções agrícolas, que somadas, correspondem a maioria da produção total agrícola brasileira, além de todos os tipos de rebanhos abordados no relatório.

Referente aos resíduos das culturas agrícolas, foi realizada uma busca na literatura para identificar a porcentagem de resíduos gerados para cada uma das culturas. A estimativa de resíduo gerado a partir de culturas agrícolas foi obtida pelo somatório da multiplicação da produção anual pela porcentagem de resíduos de cada cultura. De maneira análoga, para os rebanhos foi encontrada na literatura a quantidade de esterco produzida por dia por animal para determinar a estimativa da disponibilidade deste resíduo. Com relação aos resíduos florestais, foram consultados relatórios do IBGE referente a produção de madeira em tora, e este valor foi multiplicado pela estimativa de resíduo lenhoso para cada metro cúbico produzido a partir da literatura (ALMEIDA, 2018). O resíduo gerado a partir de lodo de ETE foi encontrado consultando-se o relatório do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS, 2023). A geração dos resíduos sólidos urbanos foi encontrada a partir de dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). O valor foi multiplicado pela porcentagem de tipos de resíduos com aproveitamento para o biochar, esta

porcentagem foi encontrada através de estudo de gravimetria dos resíduos sólidos urbanos no Brasil realizado em 2020 (ABRELPE, 2020).

4.6 BIOCHAR E OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O presente estudo analisou a relação entre o uso do biochar e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Para tal, foi realizada uma revisão abrangente da literatura para compreender as pesquisas existentes sobre o uso de biochar e suas implicações nos ODS. A partir disso, foi definido que esse estudo teria enfoque nos objetivos 6 (Água Potável e Saneamento), 7 (Energia Limpa e Acessível), 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e 15 (Vida Terrestre), devido à relação entre o biochar e a gestão da água, acesso à energia, mitigação das mudanças climáticas e a promoção da biodiversidade. A metodologia adotada pode oferecer uma compreensão dos impactos do biochar em direção à consecução desses objetivos globais.

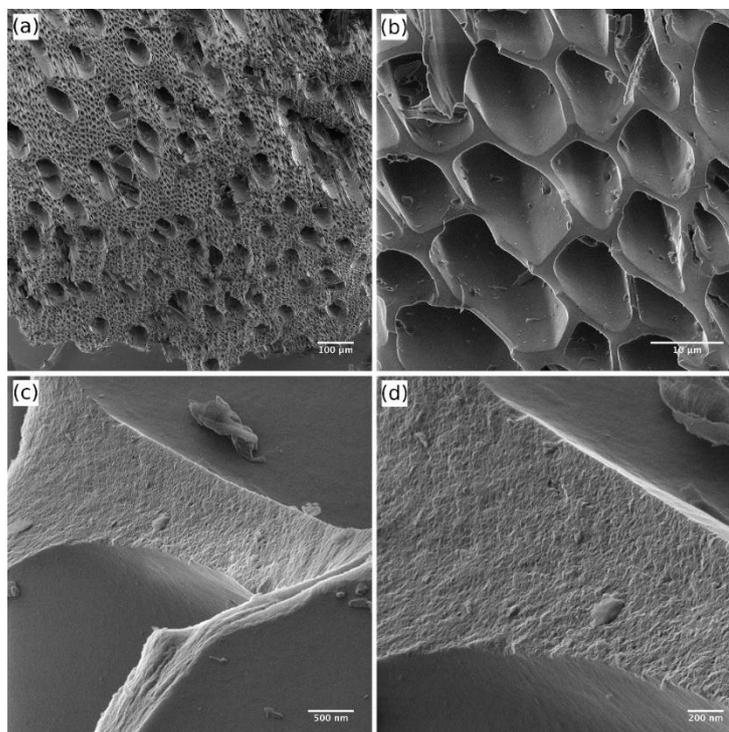
5 DESENVOLVIMENTO

5.1 AVANÇOS NAS PESQUISAS SOBRE BIOCHAR

5.1.1 Processos de produção de biochar

No panorama atual, a busca por soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos e a mitigação dos impactos ambientais tem se tornado cada vez mais crucial. Nesse contexto, o biochar emerge como uma alternativa promissora, apresentando características que o tornam um material de interesse para o tratamento e valorização de resíduos (KAMBO; DUTTA, 2015a). O biochar pode ser definido como "um material sólido rico em carbono resultante da conversão termoquímica de biomassa (casca de arroz, serragem de madeira, lodo de esgoto, restos de alimento e borras de petróleo) a temperaturas abaixo de 900 °C em um ambiente com restrição de oxigênio" (GODLEWSKA et al., 2017). O biochar possui propriedades químicas, físicas e biológicas únicas, como uma grande área superficial específica, alto volume de poros (Figura 1), grupos funcionais na superfície, alto teor mineral e de carbono (ZHANG et al., 2019b). Dentre os processos de produção de biochar pode-se identificar a pirólise, a gaseificação, a carbonização hidrotérmica e a torrefação, os quais serão discutidos abaixo e exemplificados na Tabela 2.

Figura 1 - Imagens de Microscopia com Íons de Hélio com o biochar de salgueiro. Tamanho das imagens (a) 1 mm, (b) 50 μm , (c) 4 μm e (d) 2 μm . Na imagem (a) a porosidade geral do biochar é mostrada enquanto a imagem (b) é focada em poros com diâmetro de aprox. 5–10 μm .



Fonte: Rasa et al. (2018).

5.1.1.1 Pirólise

A pirólise é um processo termoquímico realizado para converter biomassas em produtos de alto valor, como biochar, bio-óleo e gás de síntese, na ausência de oxigênio em uma faixa de temperatura de 300 a 900 °C (LIU et al., 2014). A pirólise é uma alternativa interessante do ponto de vista ecológico, pois a ausência de oxigênio não permite a combustão da biomassa durante o processo, impedindo a geração de substâncias tóxicas e emissões de poluentes (VELMURUGAN, 2022). Em geral, a pirólise pode ser subdividida em pirólise lenta (baixa taxa de aquecimento e longo tempo de residência) e pirólise rápida (alta taxa de aquecimento e curto tempo de residência), com base na temperatura, taxa de aquecimento, pressão e tempo de residência utilizado (RUSSELL et al., 2017).

A pirólise lenta é realizada a temperaturas de 400 a 600 °C, com o objetivo de maximizar o rendimento de biochar, juntamente com uma pequena quantidade de bio-óleo

condensado e gás de síntese incluindo H₂ (hidrogênio), CH₄, CO₂, CO (monóxido de carbono) e hidrocarbonetos (AL ARNI, 2017). Este processo é realizado à pressão atmosférica e caracteriza-se por um tempo de residência relativamente longo (> 1 h) e taxas de aquecimento baixas (5 a 7 °C/min). Diferentes tipos de reatores têm sido usados para a produção de biochar, como tambores agitados, fornos rotativos de areia, reatores de vagão e fornos de pirólise de pás (ZHANG et al., 2019b). Estudos observaram que o biochar obtido a partir de resíduos de madeira de pinheiro por meio de pirólise lenta ofereceu um método eficaz de sequestro de carbono e remoção de contaminantes metálicos de soluções aquosas (ABDEL-FATTAH et al., 2015). Tal biochar estava abundantemente dotado de grupos funcionais de oxigênio, apresentando uma relação O/C (oxigênio/carbono) de 0,19, altos teores de cálcio e uma modesta área de superfície Brunauer-Emmett-Teller (BET) de aproximadamente 4,6 m²/g, com uma grande quantidade de microporos (ABDEL-FATTAH et al., 2015).

A pirólise rápida oferece vantagens promissoras ao maximizar o rendimento de bio-óleo (até 75%) a partir da biomassa, com uma taxa de aquecimento geralmente acima de 200 °C/min e um tempo de residência inferior a 10 segundos (QIAN et al., 2015). Diferentes tipos de reatores têm sido usados para a pirólise rápida, como leitos fluidizados borbulhantes, leitos circulantes, reatores de cone rotativo e reatores ablativos (GARCIA-NUNEZ et al., 2017). Em um estudo foi utilizada a casca de arroz e serragem de olmo (árvore nativa da Europa) como matéria-prima para produzir biochar por meio de pirólise rápida, de forma a avaliar seu efeito nos elementos disponíveis no solo. Os resultados revelaram que o biochar derivado de casca de arroz tinha mais grupos funcionais, tornando-o mais estável que aquele derivado de serragem de olmo (WANG; YIN; LIU, 2014).

5.1.1.2 Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico no qual uma fonte de carbono, geralmente com baixo teor de umidade, é primariamente decomposta em uma mistura gasosa (gás de síntese contendo H₂, CO, CO₂, CH₄ e uma pequena quantidade de hidrocarbonetos) na presença de um agente oxidante a altas temperaturas (> 700 °C) (QIAN et al., 2015). O agente oxidante pode ser oxigênio, ar, vapor d'água ou misturas desses gases. O rendimento típico de biochar da gasificação é cerca de 10% em peso da biomassa. Em geral, a quantidade de biochar produzido na gasificação é menor do que na pirólise devido à conversão do carbono em monóxido de

carbono na presença do agente oxidante (O_2 ou vapor d'água) no primeiro processo (MOHAN et al., 2014). O biochar gerado a partir do processo de gasificação contém um alto nível de metais alcalinos, alcalino-terrosos (Ca, K, Si, Mg etc.) e hidrocarbonetos poliaromáticos, considerados tóxicos em altas quantidades para a saúde humana e o meio ambiente (KAMBO; DUTTA, 2015b).

Apesar disso, o processo de gaseificação tende a produzir biochar com partículas menores quando comparado com o processo de pirólise, melhorando suas propriedades físicas (YARGICOGLU et al., 2014). Um estudo comparou as propriedades físico-químicas de seis granulações de biochars produzidos a partir de resíduos de madeira (resíduo florestal) por meio de gaseificação e pirólise rápida. Através do estudo foi possível verificar que as condições de produção parecem determinar o teor de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos presentes no biochar (HAPs). Maiores teores de HAPs são observados no biochar produzido por pirólise rápida, enquanto os menores teores entre o biochar produzido por gaseificação (YARGICOGLU et al., 2014). Sabendo da toxicidade dos HAPs (KAMBO; DUTTA, 2015b) e qual processo de produção gera uma menor porcentagem desse composto, a gaseificação se torna mais vantajosa considerando este aspecto.

5.1.1.3 Carbonização hidrotérmica

A carbonização hidrotérmica (CHT), diferentemente dos processos de pirólise e gasificação, é mais adequada para tratar biomassas com alto teor de umidade (LEE et al., 2018). A CHT de biomassa é considerada uma alternativa vantajosa para produzir biochar, uma vez que geralmente é realizada em temperaturas baixas, entre 180 e 250°C, sob pressão autógena na presença de água (LIBRA et al., 2014). O produto de interesse no processo de CHT é o hidrocarvão — um biochar com características diferentes daqueles produzidos através da pirólise e gaseificação — cujo rendimento pode variar de 40 a 70% em peso (YAN et al., 2010). Um estudo verificou que o hidrocarvão e adsorventes à base de biochar (pirólise lenta) produzidos a partir de matérias-primas renováveis têm capacidades de adsorção de fosfato (P) na faixa de 14 a 386 mg g⁻¹ e 3 a 887 mg g⁻¹, respectivamente, dependendo da matéria-prima utilizada e das condições de carbonização/pirólise (SHYAM et al., 2022).

Oliveira et al. (2013) relataram que a combinação de diferentes resíduos agropastoris leva à produção de diferentes qualidades de hidrocarvão, bem como diferentes rendimentos de

massa e energia. O uso de mais resíduos lignocelulósicos leva a maiores rendimentos de massa e energia para o hidrocarvão produzido. Já resíduos ricos em carboidratos de menor peso molecular, como silagem de milho, levam à produção de um hidrocarvão de melhor qualidade e mais semelhante a lenhite - turfa (OLIVEIRA; BLÖHSE; RAMKE, 2013). A água gerada no processo (efluente) pode ser reutilizada, reduzindo o impacto ambiental da CHT e aumentando a eficiência energética (ZHANG et al., 2019b). Sabio et al. (2016) investigaram os efeitos da temperatura, proporção biomassa/água e tempo de residência na CHT de casca de tomate. Os resultados mostraram que a temperatura e o tempo de residência, e não a proporção biomassa/água, tiveram impacto majoritário no rendimento de hidrocarvão e na densificação de energia (SABIO et al., 2016).

5.1.1.4 Torrefação

A torrefação é um método de pré-tratamento térmico de biomassa, o qual geralmente é realizado com taxa de aquecimento lenta e, portanto, é identificado como uma forma suave de pirólise (ZHANG et al., 2019b). Os voláteis, incluindo umidade, dióxido de carbono e oxigênio da biomassa, podem ser removidos sob atmosfera inerte na ausência de oxigênio a 200-300 °C por meio de diferentes reações de decomposição, com o objetivo de melhorar as propriedades termoquímicas da biomassa, aumentar o rendimento de gás de síntese e alterar o comportamento de combustão (YU et al., 2017). Assim, um biochar com maior poder calorífico pode ser produzido por meio da torrefação. Esse processo leva a uma perda de peso de aproximadamente 30%, perdendo apenas 10% da energia contida na biomassa na forma de gases, portanto, a densidade de energia específica da biomassa torrefeita (biochar) é aumentada (KAMBO; DUTTA, 2015b).

O estudo de Nakason et al. (2019) utilizou quatro tipos de resíduos agrícolas com diferentes quantidades de resíduos lignocelulósicos, incluindo casca de arroz, casca de coco, rizoma de mandioca e sabugo de milho, os quais foram torrificados em ambiente inerte a 200-300 °C por 30 minutos. O biochar proveniente do sabugo de milho torrificado forneceu a maior razão de combustível (2,18), que é uma medida que representa a relação entre a energia liberada durante a queima de um material e a energia necessária para iniciar e manter a combustão. Além disso, o biochar obtido no estudo de Nakason et al. (2019) apresentou as menores razões atômicas de O/C e H/C (0,18 e 0,67, respectivamente). Isso é comparável ao carvão betuminoso,

um tipo de carvão mineral formado a partir da compactação de material vegetal ao longo de milhões de anos, contendo um seu alto teor de carbono e potencial fonte de energia, podendo ser utilizado na produção de eletricidade e na fabricação de produtos químicos (NAKASON et al., 2019). Já os resíduos agrícolas com alto teor de celulose (44,41%) pôde produzir biochar com o máximo rendimento de energia (86,22%) (NAKASON et al., 2019).

Tabela 2 - Rendimento em biochar a partir de diferentes métodos de produção e resíduos.

Método de Produção	Resíduo	Temperatura (°C)	Rendimento Biochar (%)	Referência
Pirólise rápida	Casca de arroz	550	38,86	ZHANG; XIONG, 2016
	Pneus usados	500	40,00	RACLAVSKÁ et al., 2015
	Palha de trigo	500	26,00	FUNKE et al., 2018
	Esterco de porco	450	25,20	ZHOU et al., 2021
	Lascas de madeira	450	18,50	ZHOU et al., 2021
Pirólise lenta	Casca de arroz	300	37,71	VIEIRA et al., 2020
	Casca de café	350	39,82	SETTER et al., 2020
	Palha de trigo	300	94,80	RONSSSE et al., 2013
	Esterco de vaca	300	84,10	HOSSAIN et al., 2021
	Madeira de pinho	300	89,80	RONSSSE et al., 2013
Gaseificação	Casca de arroz	650	39,00	YUAN et al., 2018
	Lascas de madeira	650	27,00	QIYUAN et al., 2018
	Capim elefante	300	14,29	ADENIYI; IGHALO; ONIFADE, 2021

	Bagaço de uva	1200	15,00	HERNÁNDEZ et al., 2020
	Planta miscanthus	600	25,53	TIAN et al., 2021
Carbonização hidrotérmica	Madeira de pinho	180	79,50	HEIDARI et al., 2021
	Silagem de milho	200	72,60	MILIOTTI et al., 2020
	Resíduo sólido urbano	180	48,70	MERZARI et al., 2018
	Planta miscanthus	260	55,00	KAMBO; MINARET; DUTTA, 2018
	Lodo de ETE	180	66,20	PENG et al., 2016
		Casca de arroz	200-300	94,30–70,40
Torrefação	Casca de café	200-300	94,50–55,40	ZHANG et al., 2018
	Lascas de madeira	200-300	96,20–48,20	ARRIOLA et al., 2020
	Casca de laranja	200-250	49,30–33,30	BRACHI et al., 2019
	Resíduo hospitalar	200-300	93,10–55,70	ZHANG et al., 2018

Fonte: Adaptado de Safarian (2023).

5.1.2 Avanços nas pesquisas

Na tabela 3 está descrita a quantidade de artigos publicados por ano de cada método de produção (pirólise, gaseificação, carbonização hidrotérmica e torrefação) de acordo com a base de dados *Scopus*. A partir dos resultados, pode-se observar que a pirólise é o processo mais estudado na produção do biochar, com um total de 7.574 artigos publicados no período de 2019 a setembro de 2023. Os estudos sobre pirólise continuam a ser um assunto de pesquisa amplamente explorado devido à sua habilidade em gerar produtos com diversas aplicações. O produto líquido é comumente chamado de bio-óleo, o qual pode ser armazenado e refinado para a produção de energia, já a fração volátil contém uma mistura de gases não condensáveis, como

CO, CO₂, H₂, CH₄ e hidrocarbonetos mais pesados, os quais são geralmente chamados de gás de pirólise ou gás de síntese (KUNG; MU, 2019). O produto sólido deste processo (biochar) possui alto teor de carbono, podendo ser usado, por exemplo, como fonte de energia ou na melhoria de solos (FOONG et al., 2020). A dispersão desses produtos derivados da pirólise é reconhecida como diversificada, sendo dependente da composição da biomassa utilizada como matéria-prima (DE et al., 2022).

Tabela 3 - Quantidade de artigos publicados durante os anos de 2019 e 2023 de acordo com os processos de produção do biochar. Base de dados: *Scopus*.

Processo de Produção	Artigos Publicados					Total
	2019	2020	2021	2022	2023*	
Pirólise	1.042	1.343	1.525	2.043	1.621	7.574
Gaseificação	151	153	155	239	183	881
Carbonização hidrotérmica	78	96	100	142	103	519
Torrefação	71	67	75	102	74	389
Total	1.342	1.659	1.855	2.526	1.981	9.363

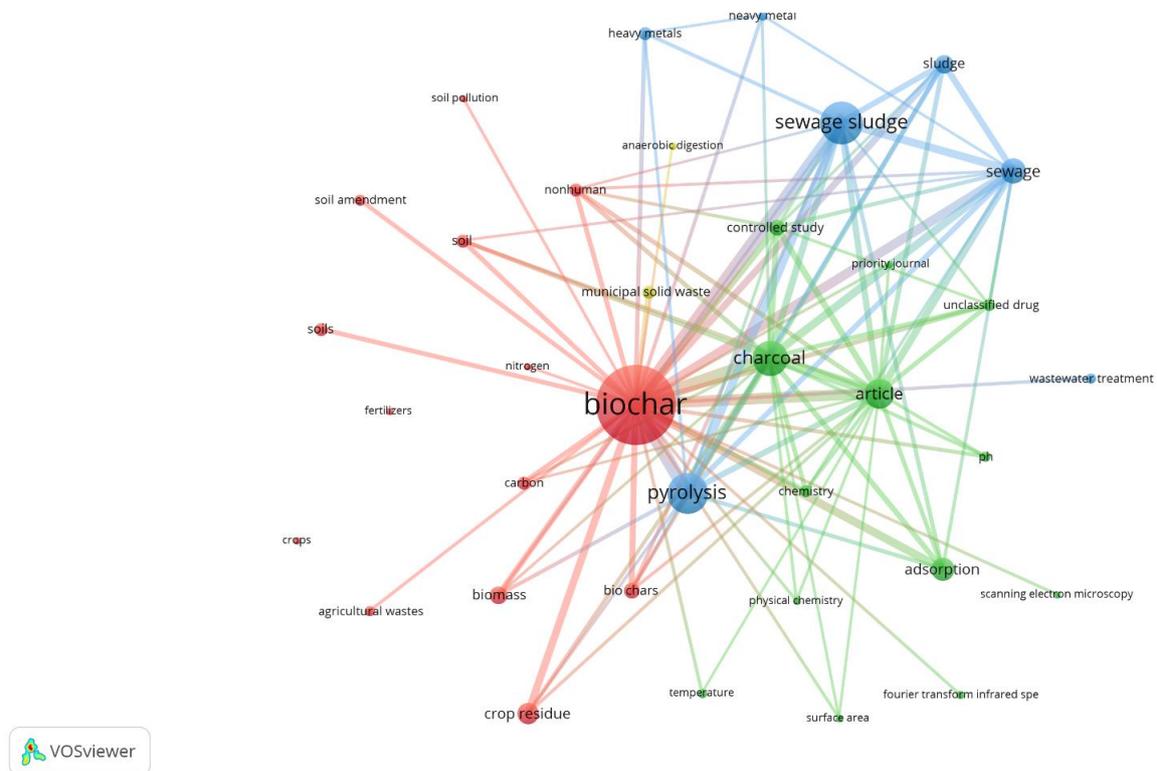
*até setembro de 2023.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A crescente rede de pesquisa em torno do biochar está evidenciada por um mapa de palavras-chave, que revela uma interconexão multifacetada entre uma série de termos essenciais (Figura 2). A "pirólise" e a "temperatura" emergem como fatores críticos na produção de biochar, destacando a influência das condições de temperatura na qualidade e nas propriedades do produto resultante. Além disso, o uso de "resíduos agropecuários", "lodo de ETE" e "resíduos sólidos urbanos" demonstra uma abordagem crescente para a produção de biochar ao transformar esses resíduos em recursos, contribuindo assim para a sustentabilidade ambiental. A importância das "propriedades adsorptivas" destaca como o biochar pode ser um agente eficaz no "melhoramento do solo", reduzindo a lixiviação de nutrientes e minimizando a "poluição do solo" por "fertilizantes" e "metais pesados". Assim, a caracterização do biochar para a determinação das suas propriedades "físico-químicas", como, por exemplo, "área de

superfície”, “capacidade adsortiva” e pH, são cruciais para verificar o seu potencial de aplicação.

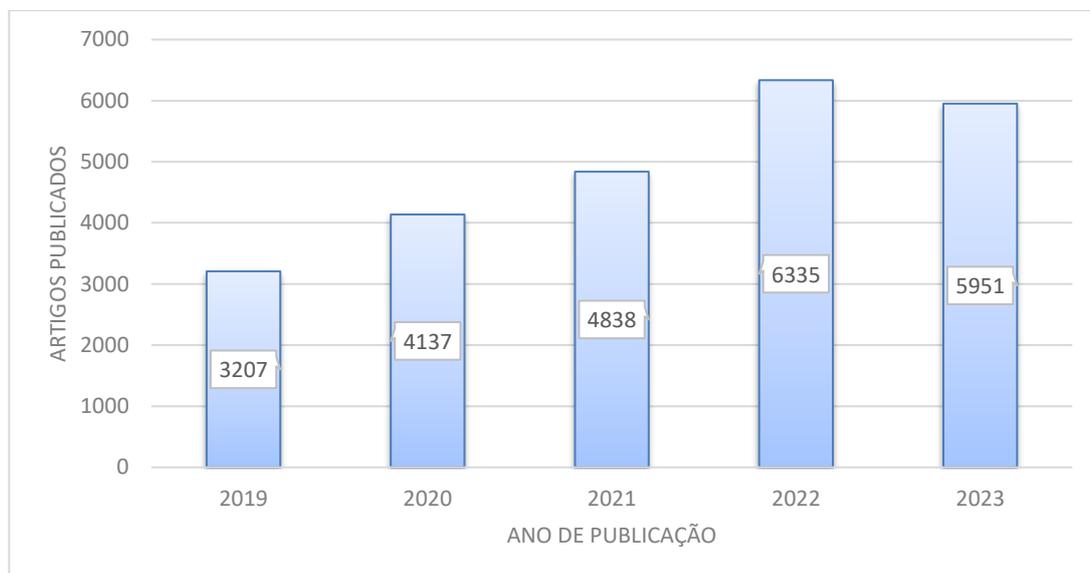
Figura 2 - Rede de palavras-chave com pelo menos 100 ocorrências, relacionadas à produção de biochar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As propriedades do biochar variam de acordo com o tipo de biomassa e do processo de produção utilizado (ZHANG et al., 2019b). Kang et al. (2018) empregaram a pirólise lenta para gerar biochar a partir de cascas de nozes, obtendo um material com uma área de superfície específica e uma porosidade elevada, o que contribuiu significativamente para a capacidade de adsorção de corantes básicos (KANG et al., 2018). Outro estudo utilizou pirólise com micro-ondas para produzir biochar a partir de lodo de ETE, o qual apresentou alta porosidade, alta concentração de nutrientes (N, P e K) e baixa concentração de metais pesados (BHATTA KAUDAL; APONTE; BRODIE, 2018). Quando aplicado ao solo, tal biochar proporcionou melhorias substanciais no crescimento das plantas, bem como na eficiência de absorção de nitrogênio e fósforo pelas raízes das plantas (BHATTA KAUDAL; APONTE; BRODIE, 2018).

Figura 3 – Artigos com a palavra-chave “biochar” publicados nos anos de 2019 a setembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O presente estudo levantou a quantidade de artigos publicados nos últimos 5 anos (2019 a 2023) e observou que houve um aumento persistente no número de publicações (Figura 3). Isso corrobora com o estudo bibliométrico de Wu et al. (2023), o qual identificou uma crescente de artigos publicados no ano de 2021, indicando um aumento do conhecimento científico em pesquisas sobre biochar e mostrando o interesse pelo tema e sua relevância (WU et al., 2023). O mesmo estudo enfocou o lodo de esgoto como resíduo mais abordado em pesquisas de biochar; achado similar ao presente estudo (Tabela 4). Este fato pode estar relacionado ao uso do biochar proveniente de lodo de esgoto para imobilizar metais tóxicos como, por exemplo, cádmio (Cd), despertando a atenção dos pesquisadores. O interesse de pesquisa ampliado em relação ao Cd deve-se à sua alta toxicidade e carcinogenicidade, mesmo em baixas concentrações (RAI et al., 2019).

Tabela 4 – Artigos encontrados na estratégia de busca de produção de Biochar de acordo com cada tipo de resíduo e o ano de publicação, durante o período de 2019 a 2023. Base de dados: *Scopus*.

Matéria- prima (biomassa)	Artigos Publicados 2019	Artigos Publicados 2020	Artigos Publicados 2021	Artigos Publicados 2022	Artigos Publicados 2023*	Total
Resíduo Lodo de ETE	214	256	322	396	322	1.510
Resíduo Agropastoril	193	236	236	273	197	1.135
Resíduo Industrial	102	130	176	258	214	880
Resíduo Sólido Urbano	46	40	54	56	52	248
Resíduo Florestal	38	44	46	48	45	221
Total	593	706	834	1031	830	3.994

*até setembro de 2023.

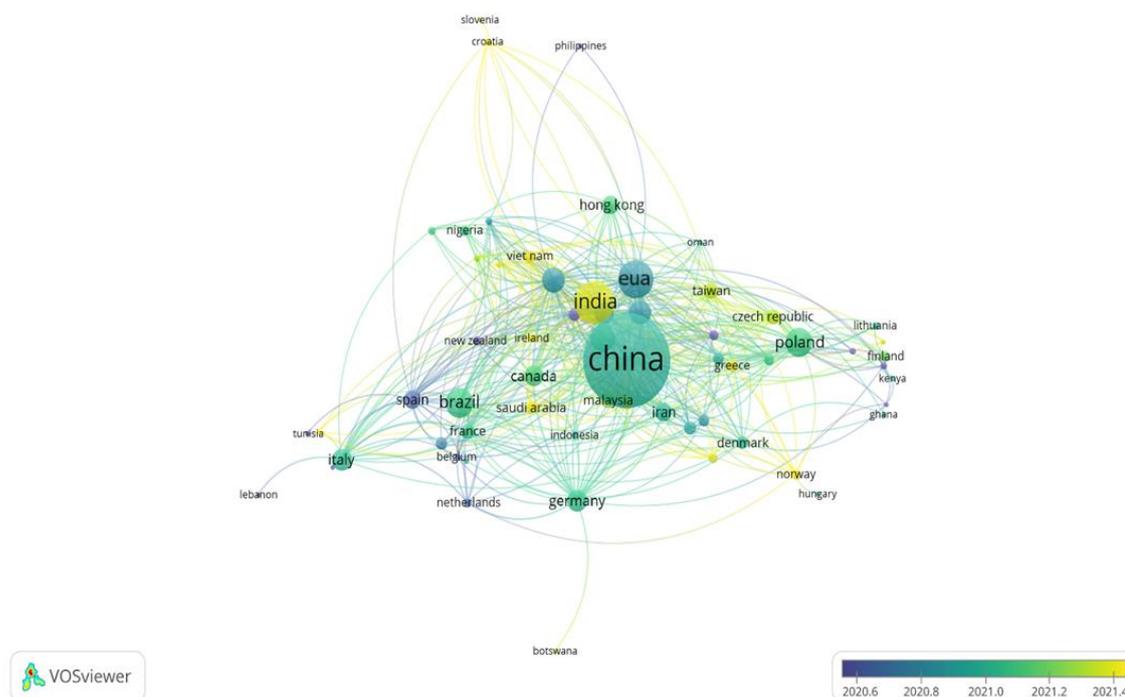
Fonte: Elaborado pelos autores.

A matéria-prima para a produção de biochar geralmente é derivada de resíduos agrícolas e florestais, resíduos municipais urbanos, resíduos industriais e provenientes de lodo de ETE. Sabe-se que as matérias-primas desempenham um papel importante na síntese de biochars, fornecendo propriedades físico-químicas diferentes de acordo com o tipo de biomassa utilizado (GHODAKE et al., 2021). As matérias-primas à base de resíduos florestais geralmente resultam em biochars que contêm a maior área superficial específica em comparação com outras matérias-primas, devido à estrutura porosa natural desses resíduos florestais, que é preservada durante o processo de pirólise (WEBER; QUICKER, 2018).

Outro estudo reportou que resíduos agropastoris, industriais, sólidos urbanos e proveniente de lodo de ETE levaram à formação de biochars com capacidade de troca catiônica elevada em comparação com biochars proveniente de madeira, o que pode afetar a sorção de nutrientes após a aplicação no solo (AHMAD et al., 2014). Uma meta-análise de Ippolito et al.

(2020) concluiu ser possível prever maiores concentrações de certos nutrientes no biochar (N, P, K, Ca, Mg, Fe, and Cu) com base na escolha da matéria-prima e no conteúdo total de nutrientes da matéria-prima (IPPOLITO et al., 2020). Os dados coletados mostraram que pode-se prever razoavelmente uma maior concentração de nitrogênio disponível a partir de biochars de madeira macia, milho, esterco de porco e esterco de gado; maiores concentrações de fósforo disponível a partir de biochars de milho, palha de trigo e casca de arroz; e potássio disponível a partir de biochars de madeira dura, madeira macia e trigo (IPPOLITO et al., 2020). Os resultados podem ser usados para criar biochars personalizados para ajudar a resolver questões ambientais e fornecer uma variedade de nutrientes disponíveis para o crescimento das culturas (IPPOLITO et al., 2020).

Figura 4 - Rede de países que obtiveram mais artigos publicados relacionadas à produção de biochar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação à produção de conhecimento acerca do biochar por países (Figura 4), foi observado uma prevalência da China como o país que mais publicou artigos relacionados ao biochar, seguido da Índia e Estados Unidos da América (EUA). Uma revisão sistemática concluiu que a dominância desses 3 países na produção do biochar se deu por alguns fatores, tais como grandes populações de habitantes e altas emissões totais dos gases de efeito estufa

provenientes da agricultura e da queima de combustíveis fósseis (MEHMOOD et al., 2017). Estes fatores podem estar relacionados com a necessidade de pesquisa e inovação em tecnologias agrícolas e de sustentabilidade para garantir a segurança alimentar e a capacidade do biochar de capturar e armazenar carbono.

A Tabela 5 detalha a publicação de artigos entre 2019 e setembro de 2023 sobre biochar para cada categoria de resíduo considerada para os três países com os maiores números de publicações (China, Índia e EUA) bem como para o Brasil, que representa o local de realização do estudo. Segundo a Tabela 5, a China publicou 1.716 estudos, seguido da Índia com 491 artigos publicados. O enfoque principal do país chinês foi biomassa proveniente de lodo de esgoto, o que pode ser justificado pela rápida industrialização e urbanização, gerando uma produção anual de lodo em torno de 39,04 milhões de toneladas (WEI et al., 2020; ZHOU et al., 2022).

A Índia e os EUA publicaram mais artigos relacionados aos resíduos agropastoris na produção de biochar. Na Índia a alta taxa de artigos publicados relacionados à utilização dos resíduos agropastoris pode ter relação com a agricultura como fonte de subsistência para populações rurais, além de contribuir para a segurança alimentar da população geral (PANDEY; KUMARI, 2021). Já o maior número de publicações dos EUA, pode ter relação com a alta geração de resíduos agrícolas proveniente da forte presença no agronegócio (GARCÍA-CONDADO et al., 2019). O Brasil focou na produção de biochar a partir de resíduos industriais e lodo de esgoto, o que pode estar relacionado com o rápido desenvolvimento econômico, que gera maior quantidade desses resíduos. Talvez o maior número de pesquisas nesses tópicos seja um indicativo do interesse pela valorização de resíduos por parte das indústrias e ETE, as quais almejam processos mais sustentáveis (RISSMAN et al., 2020).

Tabela 5 - Artigos encontrados pela estratégia de busca de produção de biochar de acordo com cada tipo de resíduo e o país de publicação. Base de dados: *Scopus*.

País	Matéria-prima (biomassa)					Total
	Resíduo Lodo de ETE	Resíduo Agropastoril	Resíduos Sólidos Urbano	Resíduo Florestais	Resíduo Industriais	
China	897	397	69	99	254	1.716
Índia	86	200	32	15	158	491
EUA	106	124	36	26	64	356
Brasil	63	45	9	8	65	190

Fonte: Elaborado pelos autores.

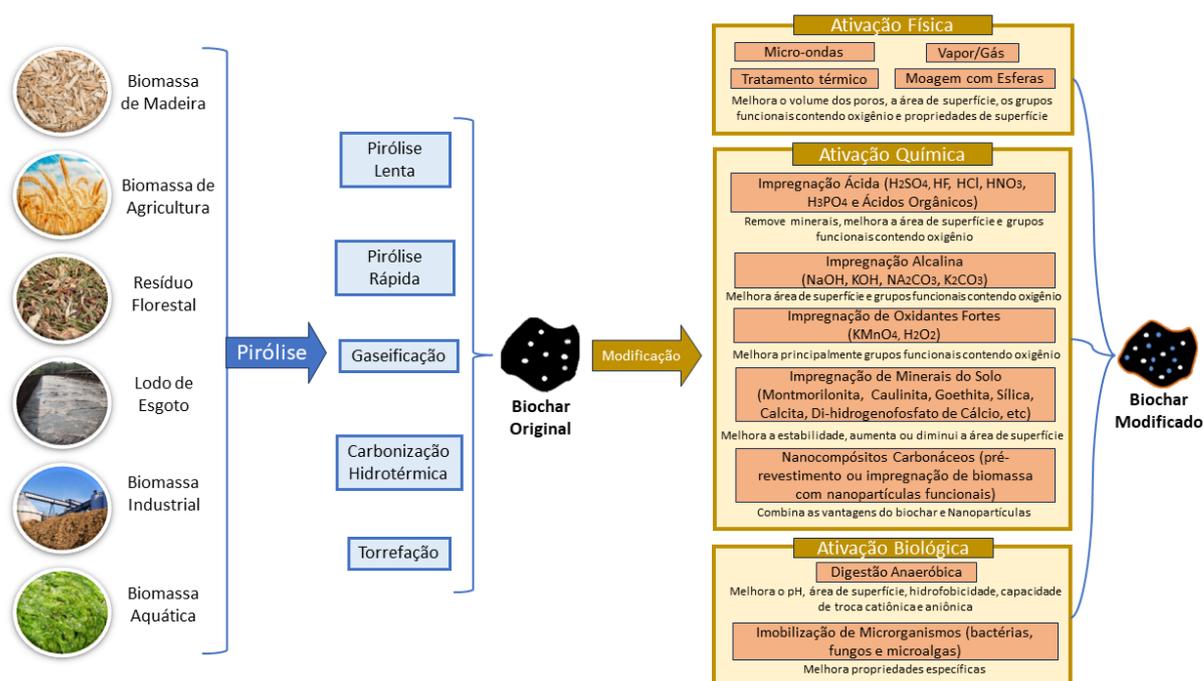
5.1.3 Processo de ativação e melhoria do biochar

O biochar é obtido a partir de uma ampla gama de matérias-primas e possui uma estrutura porosa e grupos funcionais de superfície (WANG et al., 2018). Geralmente, o biochar original, ou não-modificado, tem menor capacidade de adsorção do que o biochar ativado para contaminantes em soluções aquosas, especialmente em águas residuais com concentrações elevadas (WANG et al., 2018). Além disso, devido à sua baixa densidade e tamanho de partícula pequena, o biochar original não é separado facilmente da água, o que limita sua aplicação (TAN et al., 2016). Para maximizar a capacidade de adsorção do biochar e sua aplicabilidade em diversas áreas, foram desenvolvidos e empregados diferentes métodos de modificação do biochar (*engineered biochar*) para a sua utilização no tratamento de água, na recuperação de solos e na geração de energia (WANG et al., 2018).

O biochar modificado é resultado do biochar original alterado por meio de métodos físicos, químicos e biológicos (Figura 5) para aprimorar suas características como, por exemplo, área de superfície específica, porosidade, capacidade de troca de cátions, grupos funcionais de superfície e pH (RAJAPAKSHA et al., 2016). De acordo com diferentes requisitos de aplicação, o interesse pelo desenvolvimento de diferentes tipos de biochars modificados que possam melhorar sua aplicação ambiental tornaram-se o foco principal da pesquisa atual (WU et al., 2023). O biochar modificado possibilita alcançar características específicas que são ideais para aplicações particulares e/ou em circunstâncias específicas, resultando na otimização das propriedades favoráveis do biochar e na melhoria de sua eficácia (PANAHI et al., 2020). No

contexto da melhoria do solo, nem todos os tipos de biochar são adequados para aumentar a produtividade das plantas. Em solos densos, por exemplo, um biochar poroso é mais valorizado por seu impacto positivo no crescimento das raízes das plantas (PANAHI et al., 2020). A introdução de biochar inadequado no solo pode até aumentar a capacidade de emissão de gases de efeito estufa do solo, reduzir o teor de nutrientes no solo e perturbar as suas propriedades biológicas (PANAHI et al., 2020).

Figura 5 – Exemplos de produção de biochar modificado.



Fonte: Adaptado de WU et al., 2020.

5.1.3.1 Modificação física

Geralmente, os métodos de modificação física amplamente utilizados para o biochar incluem ativação por vapor/gás (vapor de água ou CO_2 a 700-1100 °C), modificação magnética (compostos de ferro ou óxidos de ferro), modificação por micro-ondas (frequência variando de 300 MHz a 300 GHz a 300 °C) e moagem com esferas (redução do tamanho de partícula e aumento da área superficial específica) (WANG et al., 2018). A modificação física melhora a estrutura porosa e introduz grupos funcionais oxigenados, aumentando a sua capacidade de adsorção de metais pesados, nutrientes e poluentes orgânicos (QIAN et al., 2015). Isto está relacionado ao aumento da área superficial específica e à criação de microporos no biochar.

Além disso, as vantagens da modificação física incluem a ausência de impurezas adicionais e baixo custo (WANG et al., 2018).

O método de ativação a vapor/gás envolve o processo de pirólise do biochar a uma temperatura específica, na presença de vapor d'água, dióxido de carbono, ar, entre outros (WANG; FANG, 2018). Borchard et al. (2012) mostrou que a ativação do biochar por vapor melhorou a absorção de nutrientes pelas plantas em relação ao biochar não ativado (BORCHARD et al., 2012). No tocante à remoção de poluentes, os biochars ativados por vapor/gás têm sido utilizados na remoção de metais pesados (SHIM et al., 2015), antibióticos (MONDAL; AIKAT; HALDER, 2016) e gases de efeito estufa (FUNGO et al., 2014; WANG; FANG, 2018).

A pirólise por micro-ondas utiliza a pirólise tradicional acrescida de um aparelho que emite ondas eletromagnéticas de alta frequência (300 MHz a 300 GHz), capazes de penetrar na biomassa e transferir energia rapidamente para os grupos funcionais dos reagentes (WANG; FANG, 2018). Como a modificação por micro-ondas é rápida e eficiente, permite uma distribuição interna de temperatura uniforme, sendo mais eficaz do que a pirólise convencional, gerando biochars com mais grupos funcionais e maiores áreas superficiais (WAN et al., 2009). O estudo de Du et al. (2016) utilizou a pirólise por micro-ondas e fibra de juta enxertada com grupos de ligação metálica (-COOH) a fim de aprimorar a remoção de metais pesados (DU et al., 2016), da mesma maneira, Shen et al (2015) utilizaram do biochar modificado por micro-ondas para absorver Hg (mercúrio) (SHEN et al., 2015).

A moagem em moinho de bolas é um método de processamento para refinar o tamanho de grãos de sólidos, o que pode ser uma maneira simples de modificar materiais de carbono para melhorar suas propriedades (LYU et al., 2017). A moagem em moinho de bolas tritura o biochar em pó, reduzindo o tamanho das partículas e aumentando a área superficial específica; isso incrementa os potenciais sítios de adsorção para íons orgânicos e inorgânicos (LYU et al., 2018). Uma vez que o biochar moído em moinho de bolas pode atingir tamanhos de nanopartículas, um estudo relatou que o biochar modificado por esta técnica teve um desempenho tão bom quanto nanotubos de carbono, e até melhor do que outros adsorventes comuns em termos de remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos (SHAN et al., 2016).

5.1.3.2 Modificação química

A modificação química é um método no qual agentes químicos são adicionados ao biochar após a carbonização (WANG et al., 2018). Isso faz com que o biochar tenha mais grupos funcionais e microporos, bem como uma área de superfície maior (WANG et al., 2018). Assim, a modificação química pode alterar a levar a uma melhor capacidade adsortiva após a ativação (USMAN et al., 2016). A modificação do biochar por tratamento com diferentes produtos químicos aumentou a adsorção de metais pesados (DUAN et al., 2020). Após a modificação, os grupos carboxila negativamente carregados nos biochars aumentaram as ligações com metais positivamente carregados (DUAN et al., 2020). Muitos produtos químicos têm sido usados para modificar o biochar para diferentes fins, tais como KMnO_4 (permanganato de potássio), HNO_3 (ácido nítrico), HCl (ácido clorídrico), H_3PO_4 (ácido fosfórico), H_2SO_4 (ácido sulfúrico), KOH (hidróxido de potássio) e NaOH (hidróxido de sódio) (RAJAPAKSHA et al., 2016).

Os resultados mostram que o biochar ativado com álcalis possui uma área de superfície maior do que o biochar sem tratamento e o biochar tratado com ácido. A remoção de Hg com biochar modificado quimicamente foi 2 a 3 vezes maior do que a obtida com o biochar não ativado produzido através da pirólise por micro-ondas (LI et al., 2015). Em outro estudo, foi reportado que o biochar modificado por metanol ou álcali poderia melhorar as capacidades de adsorção de tetraciclina e reduzir o teor de compostos orgânicos inerentes no biochar (JING et al., 2014). A adsorção de tetraciclina é atribuída principalmente a interações π - π e ligação de hidrogênio (LIU et al., 2012). Ma et al. (2014) utilizaram o biochar modificado com grupo funcional amino ($-\text{NH}_2$), o qual apresentou excelente desempenho de adsorção para Cu pois os grupos amino estavam quimicamente ligados aos grupos funcionais na superfície do biochar (MA et al., 2014).

5.1.3.3 Modificação biológica

A modificação biológica do biochar pode ocorrer de duas maneiras, a primeira delas consiste em um pré-tratamento da matéria-prima por meio de digestão anaeróbica ou fermentação (YAO et al., 2018). As tecnologias de digestão anaeróbica e conversão bacteriana são as maneiras mais eficazes de realizar a utilização de recursos de resíduos de biomassa (YAO et al., 2015). A digestão anaeróbica de biomassa é o uso de bactérias anaeróbicas na conversão de matéria orgânica em biogás e digestato (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009). Bactérias, como cepas modificadas de *Escherichia coli*, também foram usadas

para produzir biocombustível e bioprodutos a partir de biomassa celulósica (WANG et al., 2018). Sun, Wan e Luo (2013) sugeriram que a digestão anaeróbica poderia ser usada como um método de pós-modificação para criar sorventes à base de carbono de alta eficiência para metais pesados e corantes catiônicos de azul de metileno (SUN; WAN; LUO, 2013).

A segunda modificação é obtida inoculando-se bactérias no biochar já produzido, esse processo inclui a colonização e formação de biofilme por microrganismos na superfície do biochar (AZAD et al., 2022). As vias metabólicas presentes em microrganismos, como *Aeromonas*, *Cellulosimicrobium*, *Chloroflexi*, *Shewanella* e *Streptomyces* permitem que o biochar se integre a compostos orgânicos, resultando em metabólitos utilizáveis (WINK; MOHAMMADIPANAH; SHARIAT PANAH, 2017). Devido ao seu tamanho microscópico, esses microrganismos podem penetrar nos poros do biochar e desenvolver uma estrutura rígida de biofilme não lavável (AZAD et al., 2022). Os biofilmes realizam a degradação e remoção de poluentes inorgânicos, orgânicos e biológicos (SIMPSON, 2008). Por exemplo, microrganismos como *Clostridium*, *Paenibacillus*, *Aeromonas*, *Cellulosimicrobium*, *Chloroflexi* e *Shewanella* possuem características de bioadsorção para metais pesados (HAMED; DEHHAGHI; MOHAMMADIPANAH, 2015). Um estudo observou que o biofilme bioativo de biochar pode realizar eficientemente a adsorção e degradação (cerca de 98% de carbamazepina) em comparação com o biofilme convencional ativo em areia (cerca de 7% de carbamazepina) em uma estação de tratamento de esgoto (DALAHMEH et al., 2018).

5.1.4 Aplicações do biochar nos desafios ambientais

5.1.4.1 Gerenciamento de resíduos

O adequado gerenciamento de resíduos é uma peça fundamental na busca por práticas ambientais sustentáveis, desempenhando um papel crucial na minimização dos impactos adversos associados à disposição inadequada de resíduos sólidos (SPINOSA; CARELL, 2011). À medida que a população mundial continua a crescer e as atividades humanas geram uma quantidade cada vez maior de resíduos, a importância de estratégias eficazes para lidar com esse desafio torna-se evidente (YUSOP; OTHMAN, 2019). A maneira como tratamos e eliminamos nossos resíduos não apenas afeta diretamente a qualidade do ar, solo e água, mas também influencia a saúde dos ecossistemas em escala global (MISRA; PANDEY, 2005).

Portanto, a implementação de abordagens inovadoras e sustentáveis no gerenciamento de resíduos é imperativa para atenuar os impactos ambientais negativos e promover um equilíbrio duradouro entre as atividades humanas e o meio ambiente.

A gestão do esgoto tem se expandido em diversas nações, resultando em um aumento das quantidades de resíduos a serem descartados pelas instalações de tratamento de águas residuais (DRECHSEL; QADIR; WICHELNS, 2015). É essencial que os resíduos sejam devidamente processados antes da eliminação, visto que contêm nutrientes, agentes patogênicos, metais pesados e outros poluentes (MERZARI et al., 2019). Nesse contexto, uma estratégia promissora para abordar o desafio do gerenciamento do lodo de esgoto é a produção de biochar. Este processo oferece uma solução eficaz para a disposição de resíduos orgânicos, mas também proporciona benefícios ambientais significativos transformando o lodo de esgoto em um recurso que contribui para a sustentabilidade ecológica (ZHOU et al., 2022). O teor orgânico do biochar de lodo de esgoto varia de 41,8% a 51,6%, e suas propriedades específicas (área de superfície específica, grupos funcionais enriquecidos, composição mineral e estrutura porosa) tornam-no um bom adsorvente para a remoção de contaminantes de águas residuais (SINGH et al., 2020). O estudo de Callegari e Capodaglio (2018) verificou que após realizar uma mistura de lodo de esgoto com biochar já produzido através da pirólise, há uma diminuição da biodisponibilidade de bifenilas policloradas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no lodo de esgoto (CALLEGARI; CAPODAGLIO, 2018).

Com o aumento da população, o processo de industrialização e a crescente urbanização desempenham um papel significativo na geração em larga escala de resíduos biológicos e orgânicos, incluindo resíduos provenientes da agricultura, das florestas, de centros urbanos, rejeitos industriais, entre outros (SUSILAWATI; MAFTUAH; FAHMI, 2020). O estudo de Huang et al. (2023) utilizou biochar proveniente de resíduos industriais e agropastoris para melhorar a concentração de fósforo em uma plantação de arroz. O resultado evidenciou que o grupo adubado com biochar, tanto proveniente de resíduos industriais quanto agropastoris, apresentou maior adsorção de fósforo quando comparado com o grupo controle, melhorando a microbiologia do solo (HUANG et al., 2023). Outra revisão bibliográfica de Tan (2023) observou que o solo combinado com biochar agrícola (palha de milho, casca de coco, cascas e palha de arroz) melhorou significativamente a diversidade microbiana benéfica, aumentou a fertilidade e equilibrou as propriedades físico-químicas do solo (TAN, 2023).

A produção global de resíduos sólidos urbanos tem experimentado um acentuado aumento nas últimas décadas devido à rápida urbanização e ao crescimento populacional (LIU et al., 2018). Dado o iminente esgotamento dos locais de aterro sanitário, o processo de pirólise é considerado como uma abordagem preferencial para a conversão de resíduos em biochar, podendo reduzir de forma significativa o volume de resíduos sólidos urbanos em até 90% e estabelecer um regime de gestão de resíduos mais sustentável (CHEN et al., 2019a). O estudo de Ashiq et al. (2019) objetivou a remoção de ciprofloxacina de água residuária utilizando biochar proveniente de resíduo sólido urbano (RSU-BC) adicionado de montmorilonita (MMT). O resultado observado foi que as alterações feitas no RSU-BC através da introdução de MMT melhoraram os sítios ativos no adsorvente compósito, melhorando assim sua interação com moléculas ionizáveis de ciprofloxacina, proporcionando alta eficiência de sorção (ASHIQ et al., 2019).

Uma das principais distinções entre os resíduos industriais e os resíduos municipais é que os primeiros possuem metais pesados e resíduos tóxicos, já o segundo, geralmente são compostos por materiais orgânicos, plásticos, papel, vidro e metais (KWON et al., 2018). O aproveitamento de resíduos industriais na produção de biochar explora as propriedades específicas dos metais presentes nesses resíduos (YOON et al., 2019). No estudo de Yoon et al. (2017) o biochar obtido através da pirólise de resíduos industriais contendo ferro e cálcio (como lodo de papel ou resíduos de bauxita) exibiu um desempenho superior na adsorção de arsênico (As) e Cd (YOON et al., 2017). Em outro estudo, Cho et al. (2017) observaram que além de conferir funcionalidades específicas ao biochar, a presença de resíduos industriais incrementou a produção de gás de síntese (H_2 e CO) durante a pirólise da biomassa, devido ao efeito catalítico dos componentes metálicos na degradação térmica da biomassa (CHO et al., 2017). Adicionalmente, Cho et al. (2017) constataram que a incorporação de lodo de papel na pirólise de borra de café reduziu a produção de alcatrão, atribuindo tal fenômeno ao efeito catalítico das espécies de ferro presentes no lodo de papel (CHO et al., 2017).

Uma das possíveis estratégias para a utilização eficaz e economicamente viável de resíduos florestais é a sua conversão em biochar, o qual pode ser utilizado como adsorvente (OGINNI et al., 2020). Um estudo de Park et al. (2019) investigou as características de biochars obtidos a partir de vários resíduos de pinheiros em temperaturas de pirólise diferentes, e avaliou seus comportamentos de adsorção de Cd. No geral, o uso de biochars derivados de resíduos de pinheiros como adsorvente é considerado eficaz tanto para o tratamento de águas residuais

contendo metais pesados quanto para a reciclagem de resíduos florestais (PARK et al., 2019b). Já no estudo de Oginni et al. (2020) foi investigado os comportamentos de adsorção de fósforo de biochars originais e biochars modificados com MgO (óxido de magnésio) produzidos a partir de precursores de biomassa lenhosa (com diferentes características anatômicas e densidades semelhantes — lascas de madeira de pinheiro de folha longa, serragem de carvalho vermelho e serragem de bordo duro — e suas contrapartes impregnadas com MgCl₂ (cloreto de magnésio) (OGINNI et al., 2020). O resultado obtido evidenciou que os biochars derivados de madeira de folho duro (bordo duro e carvalho vermelho) apresentaram capacidades de adsorção de fósforo melhores do que o biochar original derivado de madeira de folha macia (pinheiro de folha longa), e os biochars modificados com MgO apresentaram capacidades de adsorção de fósforo 11 vezes superiores às dos biochars originais (OGINNI et al., 2020).

Diante do exposto, a produção de biochar emerge como uma estratégia promissora no gerenciamento e valorização de resíduos, conforme evidenciado pelos exemplos apresentados acima. A transformação de resíduos orgânicos em biochar não apenas reduz a carga ambiental associada à disposição inadequada desses materiais, mas também contribui para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa e para a promoção da sustentabilidade ambiental (KHAN et al., 2021). Além disso, a utilização estratégica de biochar no solo não só melhora suas propriedades físicas e químicas, mas também proporciona benefícios substanciais à agricultura, aumentando a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas (PALANSOORIYA et al., 2019).

5.1.4.2 Adsorvente de poluentes na água e solo

Emergente como uma alternativa promissora para a remoção de poluentes do solo e da água, o biochar possui estrutura porosa e alta área superficial, proporcionando um nicho propício para adsorção e retenção de uma variedade de poluentes orgânicos e inorgânicos (SULAYMON; ALMILLY, 2012).

No contexto do solo, o biochar demonstrou eficácia na remoção de contaminantes orgânicos, como hidrocarbonetos e pesticidas (ZHANG et al., 2019b). O possível mecanismo de adsorção envolve a integração de diversos tipos de interações, incluindo atração eletrostática, troca iônica, adsorção física, complexação superficial e/ou precipitação (TAN et al., 2015). O estudo de Cheng et al. (2020) verificou que o biochar apresenta diversos benefícios, como o

aumento do valor do pH do solo e do teor de carbono orgânico, o aumento da capacidade de retenção de água do solo, a redução do número de contaminantes, maiores rendimentos de culturas agrícolas e a inibição da absorção e acumulação de poluentes pelas raízes das plantas (CHENG et al., 2020).

Em sistemas aquáticos, o biochar revelou-se capaz de adsorver metais pesados, nutrientes em excesso e compostos orgânicos presentes na água. A interação entre as cargas superficiais do biochar e os poluentes presentes na água permitem a formação de complexos estáveis, reduzindo sua concentração (TAN et al., 2015). Portanto, é crucial considerar a seleção adequada do tipo de biochar e as condições de aplicação para otimizar os resultados desejados (ZHANG et al., 2019b). Os produtos farmacêuticos são poluentes de crescente preocupação para o ambiente aquático, uma vez que foi relatado que os produtos farmacêuticos causam efeitos adversos em sistemas aquáticos (LI et al., 2021). Um estudo de Czech et al. (2021) utilizou o biochar modificado a partir de resíduos orgânicos, o qual foi empregado para adsorver naproxeno, diclofenaco e triclosan de águas residuais (CZECH et al., 2021). A capacidade de eliminação do naproxeno (127 mg/g) foi maior do que a do triclosan (113 mg/g) e do diclofenaco (92,7 mg/g), o que pode ser atribuído à sua maior hidrofobicidade (CZECH et al., 2021).

Portanto, o biochar destaca-se como uma promissora solução para a remoção eficaz de poluentes em solo e água, devido à sua estrutura porosa e alta área superficial (OLIVEIRA et al., 2017). No solo, demonstra eficácia na remoção de hidrocarbonetos e pesticidas, além de proporcionar benefícios como aumento do pH, teor de carbono orgânico e capacidade de retenção de água (WILTON et al., 2018). Em ambientes aquáticos, o biochar adsorve metais pesados, nutrientes em excesso e compostos orgânicos, formando complexos estáveis (QIU et al., 2021). Assim, o biochar não apenas oferece uma solução eficiente de remediação ambiental, mas também contribui para práticas sustentáveis e resilientes, promovendo a qualidade do solo e da água.

5.1.4.3 Biochar para a produção de energia

A superexploração dos recursos energéticos à base de combustíveis fósseis também representa uma séria ameaça ao meio ambiente e à sociedade (YADAV et al., 2021). A queima de combustíveis fósseis produz gases de efeito estufa e vários poluentes tóxicos (mercúrio,

substâncias químicas voláteis e hidrocarbonetos policíclicos) responsáveis pelo aquecimento global e com efeitos adversos na saúde humana (PERERA, 2017). Para enfrentar todos esses problemas, o uso de energia renovável é considerado uma opção sustentável para atender à demanda de energia, além das fontes de energia não renovável existentes (RAJESH BANU et al., 2021).

A biomassa refere-se a matéria orgânica que pode ser usada como fonte de combustível e pode ser usada diretamente para substituir ou ser co-combustível com combustíveis fósseis para geração de energia (BASU, 2018). No entanto, a biomassa bruta é pouco atraente como combustível devido ao alto teor de umidade, no qual reduz a eficiência global de combustão, enquanto a baixa densidade volumétrica resulta em um custo de transporte mais alto por unidade de energia (WYN et al., 2020). A pirólise converte a biomassa bruta em produtos com propriedades de combustível aprimoradas. O biochar é o produto sólido desse processo, sendo um material que pode ser utilizado como combustível (SELVARAJOO et al., 2022).

O produto líquido da pirólise é conhecido como bio-óleo, no qual consiste em água, álcool, compostos fenólicos, hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, e compostos nitrogenados (pirazina, piridina e aminas), os quais podem ser utilizados em caldeiras para gerar calor (PATEL et al., 2020). O produto gasoso é conhecido como *syngas*, ou gás de síntese, composto por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂) e metano (CH₄) e outros gases de baixa massa molecular que podem ser usados em motores a gás após processamento. (SARAVANAN et al., 2021). A fração e as propriedades desses três produtos dependem fortemente das condições de pirólise, como temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento (SELVARAJOO et al., 2022). A pirólise rápida geralmente produz uma maior quantidade de bio-óleo e *syngas*, empregando curto tempo de residência e altas taxas de aquecimento para evitar as reações secundárias de compostos voláteis instáveis (RONSSE, 2016). Selvarajoo et al. (2022) pesquisaram o efeito da temperatura de pirólise na qualidade de biochar derivado de cascas de frutas cítricas e concluiu-se que o biochar produzido a 500 °C apresentou as melhores propriedades de combustível por possuir o maior poder calorífico (25.73 MJ/kg) e teor de carbono (SELVARAJOO et al., 2022).

Em síntese, a pirólise da biomassa resulta na produção de biochar, bio-óleo e gás de síntese, todos com significativo potencial energético (CAI et al., 2020). Estes produtos representam alternativas sustentáveis na geração de energia, destacando-se como opções viáveis para mitigar os impactos ambientais associados aos combustíveis fósseis (SALETNIK

et al., 2019). A versatilidade e eficácia dessas fontes renováveis reforçam seu papel crucial na transição para um futuro energético mais limpo e resiliente.

5.1.4.4 Contribuição do biochar para melhorias de solos

A utilização do biochar na reabilitação de solos tem despertado cada vez mais interesse devido às suas características. Como resultado, o biochar tem sido amplamente empregado em aplicações agrônômicas para: aprimorar a estrutura e a fertilidade de solos degradados, elevar a produtividade das culturas ao melhorar a retenção de água e atenuar o lixiviamento de nutrientes (CHAN et al., 2007; GLASER et al., 2009). Adicionalmente, a utilização do biochar foi considerada um meio promissor para reabilitar solos contaminados por vários poluentes como metais pesados, HPAs e pesticidas (SRINIVASAN et al., 2015).

No geral, a incorporação de biochar no solo, especialmente naqueles ácidos e não fertilizados, tem o potencial de aprimorar a qualidade do solo. Isso se reflete na melhoria dos nutrientes disponíveis, ajuste do pH, aumento do rendimento das culturas e na capacidade de retenção de água (ZHANG et al., 2019b). A habilidade do biochar em otimizar a retenção de água no solo é atribuída à sua alta porosidade e à ampla área superficial (BATISTA et al., 2018). Essas características conferem ao biochar um ambiente propício para a absorção eficaz e armazenamento de água, desempenhando um papel significativo na aprimoração da qualidade do solo (LIU et al., 2017). O aumento do rendimento das culturas pode ser atribuído à presença de vários componentes presentes no biochar, como cálcio, potássio, magnésio e fósforo (VAN ZWIETEN et al., 2010). Além disso, o biochar pode reduzir a biodisponibilidade de metais pesados, prevenindo a contaminação orgânica (através das raízes das plantas) e oferecendo efeitos de longo prazo na modificação da comunidade microbiana do solo (LEHMANN, 2007).

5.1.4.5 Biochar e o sequestro de carbono

O biochar tem ganhado crescente atenção devido às suas possíveis vantagens no sequestro de carbono e mitigação das mudanças climáticas (YANG et al., 2021a). O biochar apresenta um teor de carbono resistente à decomposição e uma capacidade robusta de adsorção

do dióxido de carbono (WU et al., 2023). Sua produção sustentável e aplicabilidade em campo potencializam sua promissora capacidade de armazenamento de carbono a longo prazo e redução das emissões de carbono, contribuindo assim para atenuar as mudanças climáticas (YANG et al., 2021a; ZHANG et al., 2022).

A produção e a incorporação de biochar têm sido cada vez mais adotadas para mitigar as mudanças climáticas globais (WOOLF et al., 2021). A funcionalidade do biochar para alcançar metas de neutralidade de carbono ocorre principalmente por meio do sequestro de carbono e da redução de emissões (CAO et al., 2021). O alto teor de carbono aromático no biochar é a base de seus benefícios de sequestro de carbono (XU et al., 2021). O armazenamento de biochar no solo por meio do manejo agrícola também pode realizar o sequestro de carbono (GUENET et al., 2021). Portanto, a conversão de resíduos de biomassa em biochar e o armazenamento do biochar produzido no solo têm um excelente potencial para o sequestro de carbono. Yang et al. (2021) realizaram uma avaliação do ciclo de vida em nível nacional para avaliar o potencial de sequestro de carbono do biochar produzido a partir de vários resíduos de culturas. Foi constatado que mais de 920 kg CO₂/t (equivalente de CO₂) de sequestro poderiam ser alcançados na China, demonstrando um grande potencial de sequestro de carbono por meio do biochar incorporado ao solo (YANG et al., 2021b).

5.2 ESCALA DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL DE BIOCHAR NO MUNDO

5.2.1 Panorama da produção industrial de biochar

A informação de mercado desempenha um papel fundamental na avaliação das oportunidades de negócios para novos produtos resultantes de pesquisa aplicada. Atualmente, o biochar está emergindo como uma *commodity* de carbono importante em diversas aplicações e está sendo negociado em quantidades crescentes a nível global (GARCIA et al., 2022). O mercado pode ser dividido em segmentos com base no processo, na matéria-prima e na aplicação (GARCIA et al., 2022). Do ponto de vista tecnológico, a pirólise lenta atualmente domina a produção de biochar, com uma fatia de mercado superior a 70%, e espera-se que apresente oportunidades significativas de crescimento nos próximos anos (GONZÁLEZ-PERNAS et al., 2022).

Nos últimos dez anos, novas aplicações de biochar [construção, materiais de alta tecnologia, pecuária, medicina e purificação de água e ar (EBI, 2023a)] impulsionaram o crescimento do setor, especialmente na China, mas também nos EUA e Europa (Tabela 6) (GARCIA et al., 2022). A China se destaca com altos valores de produção de biochar por ano (cerca de 300.000 toneladas no ano de 2022) e com um potencial produtivo ainda mais significativo, 500.000 toneladas (GARCIA et al., 2022). A presença robusta da China no mercado global de biochar pode ser justificada pela forte influência da agricultura no país, produzindo cerca de 28% do arroz mundial, 23% do milho e 48% da carne suína (BAI et al., 2022). Para atender a essa demanda, a agricultura é intensiva e requer o uso de fertilizantes, e o biochar é conhecido por melhorar a qualidade do solo e a retenção de nutrientes, o que pode ser crucial para aumentar a produtividade agrícola em uma grande escala (AGARWAL et al., 2022). Outra justificativa pelo pioneirismo chinês pode estar relacionada com o fato de que o país tem enfrentado problemas com a poluição do solo e da água devido ao uso excessivo de fertilizantes e pesticidas (ZHANG et al., 2019a). O biochar pode ser usado para remediar solos contaminados, melhorar a qualidade da água e reduzir a poluição ambiental, o que é um motivo importante para seu crescente uso na China (XIA et al., 2023).

Tabela 6 - Produção de biochar nos mercados globais de destaque.

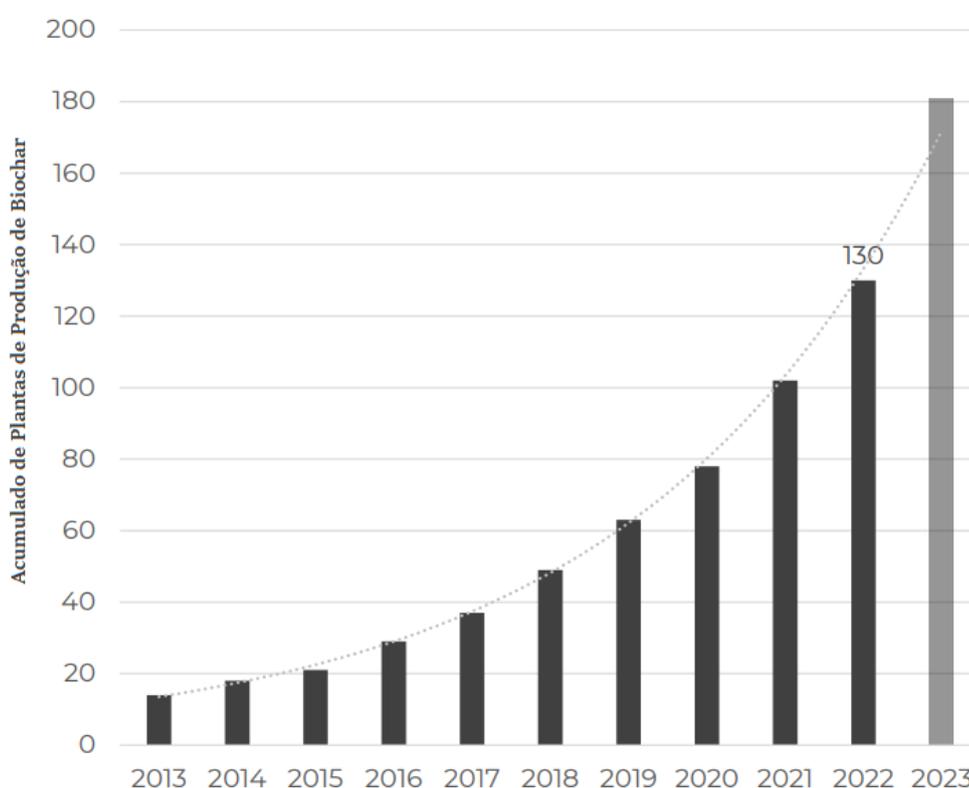
Mercado	Estimativa da produção de biochar (ton/ano)	Referências
China	280.000	(GARCIA et al., 2022)
Estados Unidos da América	50.000	(GARCIA et al., 2022)
Europa	33.000	(GARCIA et al., 2022)
Austrália	15.000	(ANZBIG, 2023)
Canadá	4.600	(DRAPER et al., 2018)
Brasil	4.000	(NETZERO, 2023)
África	2.000	(NETZERO, 2023)

Fonte: Elaborado pelos autores.

A nível europeu, um relatório recente do Consórcio Europeu da Indústria de Biochar (EBI) ofereceu uma visão valiosa do estado atual do mercado (EBI, 2023b). Até 2015, o setor era muito pequeno, com cerca de 20 instalações de produção de biochar em operação, mas a dinâmica do mercado aumentou significativamente a partir de 2016, com a instalação de mais

de 50 novas unidades (GARCIA et al., 2022). Em 2021, foram instaladas 25 plantas de produção de biochar, e em 2022, 28 novas plantas foram inauguradas, elevando o número total para 130. Tal crescimento sugere, portanto, uma rápida consolidação da indústria de biochar na Europa (Figura 6). A EBI está atualmente ciente de 51 projetos em andamento ou sob contrato para serem concluídos até 2023 (EBI, 2023b).

Figura 6 - Acumulado de plantas de produção de biochar na Europa, segundo o Relatório do Mercado Europeu de Biochar.



Fonte: Relatório do Mercado Europeu de Biochar (EBI, 2023).

A capacidade de produção de biochar denota a produção teórica máxima quantificada em massa, baseada na eficiência dos equipamentos disponíveis. Em contrapartida, a produção real refere-se à quantidade efetivamente gerada durante o período operacional, incorporando variabilidades práticas como eficiência operacional, manutenção, interrupções e disponibilidade de matéria-prima. Em termos de capacidade de produção europeia, o tamanho do mercado de biochar atingiu 53.000 toneladas em 2022, produção real de 33.500 toneladas e capacidade de produção estimada acima de 90.000 toneladas em 2023, o que significaria um

aumento de 80% (EBI, 2023b). Com um preço médio global de biochar de 800 euros por tonelada, o valor atual do mercado europeu de biochar é estimado em quase 27 milhões de euros, com boas perspectivas de crescimento contínuo (GONZÁLEZ-PERNAS et al., 2022). No mesmo período, Alemanha, Áustria, Suíça e países escandinavos (principalmente Suécia) dominaram a produção europeia de biochar, respondendo por mais de 75% do mercado (EBI, 2023b).

Nos Estados Unidos da América, a partir de 2018, 135 produtores produzem aproximadamente 50.000 toneladas métricas de biochar nos EUA (U.S. BIOCHAR INITIATIVE, 2018). Esse número de toneladas pode ser justificado pelo fato de resíduos de madeira poderem ser processados em serrarias centralizadas e, portanto, podem ser obtidos de forma fácil e barata, pois a biomassa lenhosa representou cerca de 87% da matéria-prima usada na produção de biochar em 2014 (IBI, 2014). Como perspectiva, os produtores de biochar esperam atender ao mercado de melhorias do solo e adsorventes nos próximos cinco anos (U.S. BIOCHAR INITIATIVE, 2018). No Canadá, a produção do ano de 2018 foi estimada em 4.600 toneladas (DRAPER et al., 2018), porém esse número tem um potencial de crescimento devido ao início da produção de biochar pela indústria *Airex Energy*, a qual tem estimativa de produção de 10.000 toneladas em 2024 (NICHOLAS SOKIC, 2023).

A produção de biochar na Austrália foi estimada em 15.000 toneladas por ano, com projetos em andamento e surgindo para aumentar significativamente esses números a curto prazo. A pesquisa científica sobre biochar na Austrália está em pleno andamento, com diversas universidades e instituições de pesquisa contribuindo ativamente para o conhecimento global (ANZBIG, 2023).

América do sul e África estão iniciando suas atividades, as primeiras indústrias foram instaladas respectivamente no Brasil e Camarões. No Brasil a produção real de biochar no ano de 2022 totaliza 4.000 toneladas ao ano, com expectativa de atingir 12.000 toneladas ao final do ano de 2024 (NETZERO, 2023). Com relação à Camarões, a produção de biochar no ano de 2022 foi de 2.000 toneladas de biochar (NETZERO, 2023). Representando uma pequena parcela da estimativa da produção mundial.

5.2.2 Indústrias líderes do biochar

O crescente número de indústrias de biochar em todo o mundo reflete o crescente reconhecimento das vantagens ambientais e econômicas deste produto. A Tabela 7 apresenta uma visão abrangente das 21 principais indústrias de biochar em todo o mundo, destacando seus países, início de operação, capacidades e técnicas de produção.

Tabela 7 – Compilado de empresas produtoras de biochar, identificando a capacidade de produção anual, a técnica de produção e a matéria-prima utilizada.

Empresa	País de Operação	Início das Operações em Escala*	Capacidade de Produção Anual (ton/ano)	Técnica de Produção	Matéria-prima (biomassa)
Airex Energy	Canadá	2024***	10.000	Pirólise	Resíduo madeireiro e biomassa florestal
Antaco	Reino Unido	2014	500	Carbonização hidrotérmica	Resíduo orgânico
Aries Clean Energy	Estados Unidos da América	2016	3.500	Gaseificação	Mistura de resíduos madeireiros
Arigna Fuels	Irlanda	2019	5.000	Pirólise	Resíduos agrícolas mistos
Carbo Culture	Finlândia	2023	940	Pirólise	Resíduos madeireiros
Carbofex	Finlândia	2017	2.000	Pirólise	Resíduo madeireiro proveniente de florestas locais sustentáveis certificadas
Carbonis	Alemanha	2016	360	Gaseificação	Resíduos madeireiros não tratados
CharTech Solutions	Canadá	2024***	2.000	Pirólise	-
CPL Industries	Reino Unido	2025***	2.700	Carbonização hidrotérmica	Resíduo orgânico

Circular Carbon	Alemanha	2023	3.500	Pirólise	Resíduos agrícolas (cacau)
Coaltec Energy	Estados Unidos da América	2012	3.000	Gaseificação	Esterco e grãos de destilaria
ECOERA	Suécia	2019	300	Pirólise	Resíduos agrícolas (sementes)
Husk Ventures	Camboja	2017	1.400	Pirólise	Resíduos agrícolas (casca de arroz)
Ingelia	Espanha	2017	6.800**	Carbonização hidrotérmica	Lodo de ETE, resíduos orgânicos urbanos
Meva Energy	Suécia	2023	6.000	Gaseificação	Resíduos madeireiros
Netzero (Brasil)	Brasil	2023	4.500	Pirólise	Resíduos agrícolas (café)
Netzero (Camarões)	Camarões	2022	2.000	Pirólise	Resíduos agrícolas (café)
Novocarbo	Alemanha	2023	1.700	Pirólise	Resíduos madeireiros
SoMax	EUA	2022	1.500	Carbonização hidrotérmica	Lodo de ETE
TerraNova Energy	Polonia	2024***	450	Carbonização hidrotérmica	Lodo de ETE, resíduos orgânicos urbanos

* *Empresas classificadas na categoria média (200 – 499t/ano), grande (500 – 1.999 t), muito grande (2.000 t – 4.999 t) e industrial ($\geq 5.000t/ano$), segundo o Relatório do Mercado Europeu de Biochar (EBI, 2023).*

** *Valor estimado a partir da quantidade de resíduos processados, com rendimento de 48,7% (MERZARI et al., 2018).*

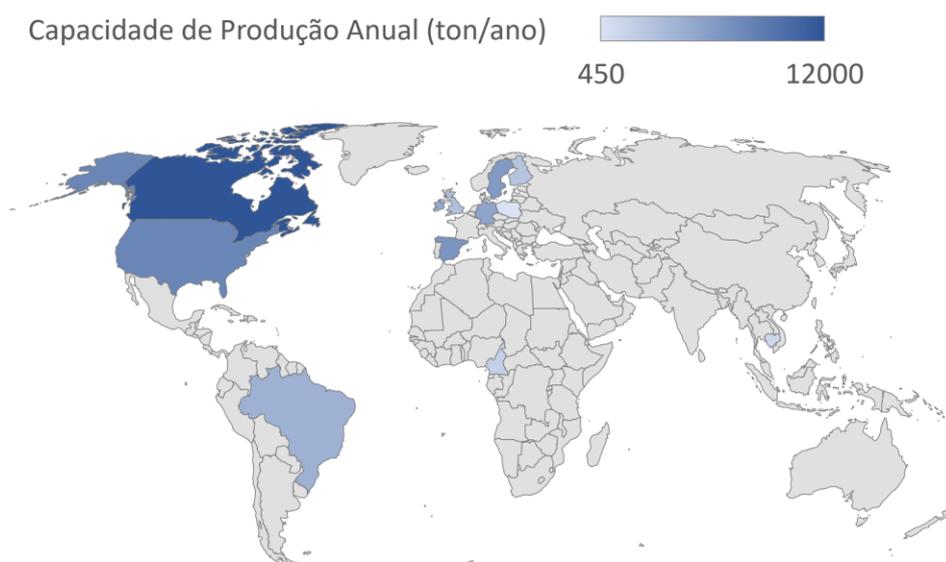
*** *Em fase de construção/implementação.*

Fonte: Elaborado pelos autores.

O biochar está sendo produzido por empresas de vários países, a Figura 7 ilustra os países abordados na Tabela 7, cada uma adotando diferentes matérias-primas e técnicas de produção para impulsionar a eficiência e a sustentabilidade do processo. Essas indústrias líderes estão engajadas em diversas práticas de produção, incluindo pirólise, gaseificação e

carbonização hidrotérmica, e utilizam uma ampla gama de matérias-primas, principalmente resíduos florestais e agrícolas. Observa-se uma predominância das indústrias nos países economicamente desenvolvidos do hemisfério norte, revelando uma faceta importante da economia global, no contexto das indústrias relacionadas à tecnologia.

Figura 7 – Mapa mundial com a capacidade de produção de biochar em toneladas por ano dos países com indústrias produtoras de biochar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com a finalidade de aproveitamento dos resíduos disponíveis em cada território, as empresas de biochar utilizam a matéria-prima mais abundante. No caso da *Airex Energy* (Figura 8), que dispõe de subprodutos de serrarias, resíduos madeireiros e biomassa florestal, a empresa recebeu um financiamento de \$38 milhões para impulsionar seu projeto de produção de biochar em Quebec, Canadá, com o Grupo SUEZ. A meta da empresa é desenvolver uma instalação de produção com uma capacidade de 30.000 toneladas anuais, dividida em três fases de 10.000 toneladas anuais cada. A intenção é iniciar as operações até o final do primeiro trimestre de 2024, com as fases planejadas para serem totalmente concluídas até 2026. A *Airex Energy* está buscando expandir suas operações para projetos futuros, para atingir 350.000 toneladas por ano no ano de 2035, sendo Europa e América do Norte os mercados-alvo (NICHOLAS SOKIC, 2023).

Figura 8 – Tecnologia CarbonFX proprietária da Airex.



Fonte: Airex Energy Inc. (2023).

A empresa *Meva Energy* iniciou suas operações no segundo trimestre de 2023 na fábrica de tecidos Sofidel em Kisa, Suécia, produzindo biochar a partir de resíduos madeireiros locais, pelo processo de gaseificação. Estima-se reduzir um total de 10.300 toneladas de CO₂ por ano a partir do biochar gerado, além disso a planta substituiu o consumo de gás fóssil na fábrica têxtil para o gás renovável (MEVA ENERGY, 2023).

No Brasil, a empresa *NetZero* está localizada no município de Lajinha, em Minas Gerais, Brasil. É a primeira unidade industrial da América do Sul inteiramente voltada para a produção do biochar; e a maior do mundo que utiliza apenas resíduos agrícolas. Foi inaugurada oficialmente em 20 de abril de 2023. A matéria prima (casca de café) é fornecida com ajuda de parceiro local (Coocafé, uma cooperativa de cerca de dez mil produtores). O biochar resultante é vendido aos agricultores da Coocafé para ajudá-los a reduzir o uso de fertilizantes enquanto aumentam suas safras e a saúde de seus solos. Sua capacidade produtiva chega a 4.500 toneladas de biochar por ano. A empresa está atualmente construindo a segunda unidade do Brasil no estado do Espírito Santo, com capacidade de produção de biochar semelhante a primeira.

5.3 POTENCIAL PRODUTIVO DO BIOCHAR NO BRASIL

No contexto do Brasil, o potencial de produzir biochar pode ser uma promissora solução para lidar com uma diversidade de resíduos provenientes de diferentes setores industriais e agrícolas (GONZAGA; SOUZA; SANTOS, 2021). Sabe-se que produção de biochar encontra-se intrinsecamente ligada à disponibilidade e quantidade de matéria-prima, a qual pode ser proveniente, por exemplo, de resíduos agropastoris, florestais, lodo de ETE, resíduos sólidos urbanos e industriais (GUPTA et al., 2020). O Brasil possui uma vasta produção de resíduos agropastoris e florestais (AMORIM; PIMENTA; SOUZA, 2021), assim como os resíduos provenientes de ETES, resíduos sólidos urbanos e industriais. Tais resíduos destacam-se como importantes fontes potenciais para a produção de biochar, especialmente em áreas urbanas e industriais densamente povoadas (GOMES, 2021).

A produção anual da agricultura brasileira é significativa, pois o Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo (SANTOS et al., 2021). O país possui uma vasta área cultivável, com 340 milhões de hectares, dos quais 63 milhões de hectares são áreas agrícolas (CLEMENTE et al., 2017). Assim, a geração significativamente elevada de resíduos agrícolas de diferentes culturas é inevitável, conforme reportado na Tabela 8. A cana-de-açúcar representa uma das principais *commodities* do Brasil e o seu bagaço é comumente incinerado nas usinas para atender às necessidades energéticas, para a produção de eletricidade e bioetanol (DIAS et al., 2013). Contudo, ao considerar os impactos dos poluentes atmosféricos liberados durante a queima do bagaço — liberação de CO₂ que contribui para o aumento do efeito estufa — torna-se essencial a busca por alternativas para uma melhor valorização deste resíduo (DE ALMEIDA et al., 2022). Conforme Hlaváčiková et al. (2019), o uso de resíduos da cana-de-açúcar na produção de biochar foi positivo em relação à retenção de nutrientes no solo e ao crescimento das culturas (HLAVÁČIKOVÁ et al., 2019). Os estudos de Kameyama et al. (2012), Lefebvre et al. (2020) e Abhijeet et al. (2022) também corroboram tal ideia ao relatar a capacidade do biochar de resíduos de cana-de-açúcar em mitigar a perda de nutrientes, além de sequestrar carbono. Clique ou toque aqui para inserir o texto.. Ademais, pesquisas de Yang et al. (2015) e Chen et al. (2022) evidenciaram melhorias nas propriedades do solo, na eficiência do uso de biomassa e nitrogênio, e na disponibilidade de nutrientes, reforçando o potencial promissor desses resíduos na produção de biochar. Clique ou toque aqui para inserir o texto.. Em

suma, o biochar derivado de resíduos de cana-de-açúcar tem potencial de oferecer benefícios tanto ambientais quanto agrícolas (DE ALMEIDA et al., 2022).

Em relação à soja, outra *commodities* brasileira, esta detém o maior valor de produção no ranking da agricultura, totalizando 345 bilhões de reais de valor de produção. A geração de resíduo no cultivo da soja foi estimada em 181 milhões de toneladas no ano de 2022 (Tabela 8) (IBGE, 2022). Na perspectiva dos resíduos agrícolas, a palha de soja é um resíduo da soja, cujo rendimento é de até 1,5 kg por kg de soja (150%), dentre os resíduos da palha de soja estão caule, folha e casca (DE PRETTO et al., 2018). Esse resíduo é comumente utilizado como alimentação para o gado, queimado ou deixado no campo para evitar a erosão do solo (GONZALEZ et al., 2022), no entanto, há alternativas sustentáveis e ambientalmente benéficas, como a utilização desses resíduos para a produção de biochar (BHATTACHARYYA et al., 2021). Além de poder ser aplicado no solo para melhorar as propriedades de cultivo (HUANG et al., 2023), o biochar proveniente de palha de soja pode ser utilizado em ambientes mais versáteis, como no manejo de resíduos da indústria têxtil – um segmento industrial que produz muitas substâncias tóxicas (VERMA; DASH; BHUNIA, 2012). Conforme Vyavahare et al. (2021), o biochar produzido com palha de soja foi eficiente na remoção de 99,73% do corante verde brilhante da água residual em 60 minutos, tornando-o uma estratégia sustentável e economicamente viável para tratar águas residuais contaminadas por corantes têxteis (VYAVAHARE et al., 2021).

O milho também se destaca como produção agrícola brasileira em 2022, 109,4 milhões de toneladas do grão foram produzidas no ano de 2022 (IBGE, 2022). Dentre os resíduos provenientes do cultivo do milho, pode-se identificar o germe e envoltórios (20%), palha, caules e folhas (78%) e a espiga de milho (22%), totalizando 131,3 milhões de toneladas de resíduos gerados (FERREIRA-LEITAO et al., 2010). Tais resíduos podem ser destinados para a produção de biochar, ao invés de permanecerem no solo. Liu et al. (2020) verificaram que a aplicação de biochar de palha de milho melhorou o crescimento de plantações de soja quando aprimorou propriedades físico-químicas do solo em solos alcalinos, tais como capacidade de retenção de água, teor total de carbono orgânico, nitrogênio e potássio disponível e capacidade de troca catiônica. (LIU et al., 2020).

Tabela 8 – Estimativa de resíduos gerados a partir de culturas agrícolas mais significativas no contexto brasileiro.

Cultura Agrícola	Produção (Mton/ano)^a	Porcentagem de resíduos^b	Estimativa de resíduo gerado (Mton/ano)
Cana-de-açúcar	724,4	64% (30% - bagaço; 34% - palha e folhas)	463,6
Soja	120,7	150% (casca, caules e folhas)	181,0
Milho	109,4	120% (20% - germe e envoltórios; 78% - palha, caules e folhas; 22% - espiga de milho)	131,3
Mandioca	17,6	216% (16% - farelo; 200% - palha, caules e folhas)	38,0
Algodão	6,4	278% (palha, caules e folhas)	17,8
Laranja	16,9	50% (bagaço, casca e sementes)	8,5
Feijão	2,8	116% (casca, caules e folhas)	3,2
Arroz	10,8	23% (casca de arroz)	2,5
Trigo	10,3	23% (farelo)	2,4
Café	3,2	55% (casca do café)	1,8
Total			850,1

^a IBGE (2022).

^b Ferreira-Leitao et al., (2010); Mendoza Martinez et al. (2021); Hamawand et al. (2016); Gómez et al. (2017); De Pretto et al. (2018).

Fonte: Elaborado pelos autores.

Outros resíduos significativos gerados a partir de culturas agrícolas brasileiras são mandioca, algodão e laranja, que juntos somam uma produção agrícola de 40,9 milhões de toneladas no ano de 2022, o que gerou cerca de 64,3 milhões de toneladas de resíduos (IBGE, 2022). O biochar proveniente de resíduo de casca de laranjas foi eficiente no melhoramento de solos (ADENIYI; IGHALO; ONIFADE, 2020), enquanto o biochar derivado de resíduos de algodão e mandioca obtiveram propriedades de aumento do pH do solo, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, ao mesmo tempo em que reduz a biodisponibilidade de metais pesados (WANG et al., 2019; WEI et al., 2022).

Referente à estimativa de resíduos gerados a partir de rebanhos pecuários (Tabela 9), os bovinos lideram a lista, contribuindo com uma quantidade substancial de esterco diário por animal. De acordo com uma estimativa, são produzidas 1.124,8 milhões de toneladas de esterco bovino por ano. Os suínos, apesar de um número menor em comparação com os bovinos, apresentam uma disponibilidade estimada de 89,5%, este fato leva a uma produção de 42,9 milhões de toneladas por ano. As aves, representadas por galináceos e codornas, contribuem com 12,8 milhões de toneladas anualmente, com uma disponibilidade de resíduos atingindo 80%. Essa disponibilidade de resíduos se deve ao sistema de confinamento dos animais, no qual os resíduos gerados podem ser facilmente captados (BOLAN; ADRIANO; MAHIMAIRAJA, 2004).

A diversidade nas características dos resíduos gerados pelos diferentes rebanhos, como a significativa quantidade produzida pelos bubalinos, os moderados volumes dos equinos e a menor contribuição dos caprinos e ovinos, evidenciam a complexidade da gestão de resíduos pecuários no país. Somando todos os rebanhos, a estimativa total de resíduos pecuários gerados anualmente atinge a expressiva marca de 1.202,8 milhões de toneladas, sublinhando a importância de estratégias sustentáveis, como, por exemplo, a produção biochar com os resíduos pastoris como matéria-prima, para mitigar os impactos ambientais associados a esses resíduos (CERVEN et al., 2021). O biochar é produzido pela conversão térmica de biomassa, sendo idealmente derivado de materiais com baixo teor de umidade e alto teor de lignina, como resíduos de agropecuários ou lenhosos, porém dependendo do processo de produção utilizado (carbonização hidrotérmica), pode-se utilizar biomassa com alto teor de umidade, enquadrando fontes como esterco de animais (AKDENIZ, 2019). Conforme Sanchez-Monedero et al. (2018), o uso de biochar proveniente de resíduos pastoris proporciona condições favoráveis, como grande porosidade e área superficial do biochar, além de alta capacidade de troca de cátions,

possibilitando um crescimento microbiano adequado, maior retenção de nutrientes para as plantas, redução nas emissões de gases de efeito estufa e imobilização de metais pesados (SANCHEZ-MONEDERO et al., 2018).

Tabela 9 – Estimativa de resíduos gerados a partir de rebanhos pecuários mais significativas no contexto brasileiro.

Rebanhos	Número de Cabeças^a	Quantidade de esterco por dia por animal (Kg)^b	Estimativa de disponibilidade do esterco (%)^b	Estimativa de resíduo gerado (Mton/ano)
Bovinos	234.352.649	27,8	47,3%	1.124,8
Suínos	44.393.930	2,96	89,5%	42,9
Aves				
(Galináceos e codornas)	1.600.076.425	0,0275	80,0%	12,8
Bubalinos	1.598.268	40,0	50,0%	11,7
Equinos	5.834.544	13,8	29,0%	8,5
Caprinos e Ovinos	33.880.507	1,45	11,5%	2,1
Total da estimativa de resíduos pecuários gerados/ano		1.202,8 milhões de toneladas por ano		

^a IBGE (2022); ^b Oliveira et al. (2020).

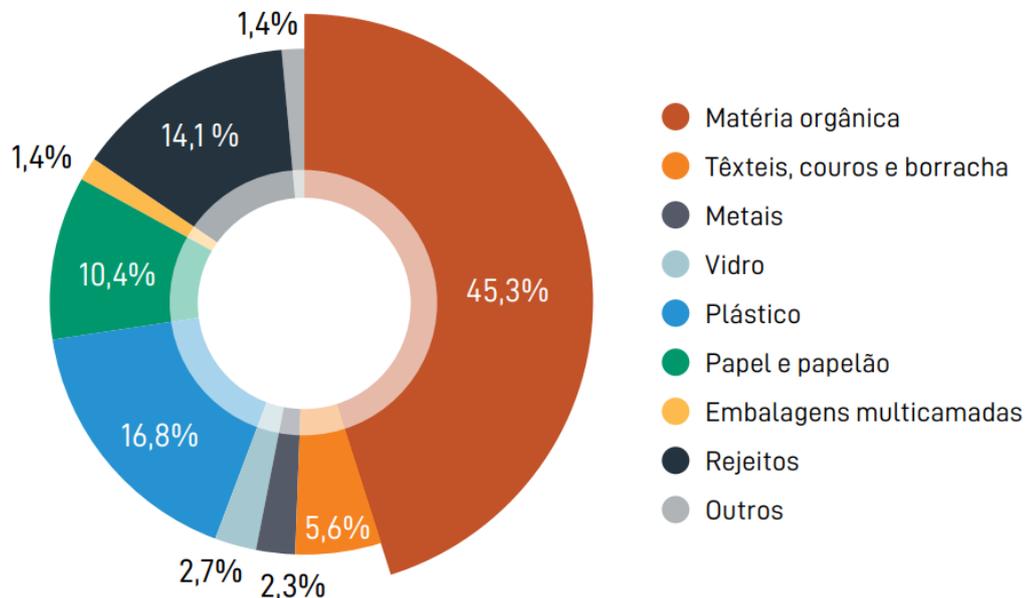
Fonte: Adaptado de Oliveira et al., 2020 e IBGE, 2022.

A produção brasileira de madeira em tora oriunda de florestas plantadas alcançou um recorde de 158,284 milhões de metros cúbicos em 2022, sendo a indústria de papel e celulose o maior destino das toras de madeira, com 99,6 milhões de metros cúbicos (IBGE, 2022). Estima-se a geração de 750 quilogramas de resíduo lenhoso para cada metro cúbico de madeira em tora (ALMEIDA, 2018), totalizando 118,7 milhões de resíduos florestais anuais (Tabela 10). Em 2022, houve acréscimo de 0,1% nas áreas de florestas plantadas no país, dentre os quais, as Regiões Sudeste (0,4%) e Centro-Oeste (5,5%) apresentaram crescimento (IBGE, 2022). Segundo Park et al. (2012) biochars produzidos a partir de biomassa lenhosa podem ser

um adsorvente potencial para a remoção de metais pesados, com o biochar de castanheira apresentando uma maior capacidade de remoção de Cu (II) quando comparado com o biochar de salgueiro (PARK et al., 2012). Sørmo et al. (2021) identificaram que o biochar produzido através de resíduos de madeira pode ser considerado potencial sorvente sustentável para reduzir a lixiviação de per e polifluoroalquil de solos contaminados, tais substâncias se acumulam no ambiente e podem potencialmente contaminar fontes de água potável (SØRMO et al., 2021). Considerando que o manejo dos resíduos florestais desempenha um papel crucial neste ciclo, destaca-se o significativo potencial da produção de biochar a partir dessa biomassa. Essa abordagem não apenas contribui para a melhoria do solo em futuras áreas de reflorestamento, mas também apresenta promissoras perspectivas no âmbito energético, mediante a aplicação da pirólise e remoção de metais pesados e poluentes (DAŹBROWSKA et al., 2018).

Outro resíduo geral em abundância é o lodo de esgoto, o qual, nos últimos anos, tem sido usado em diversas áreas, principalmente na produção agrícola. Porém, por ainda conter agentes patogênicos e poluentes orgânicos e inorgânicos, seu uso ainda tem restrições (FACHINI et al., 2021). Para tentar solucionar essa problemática, o processamento dos resíduos de lodo de ETE para a transformação em biochar tem sido apontado como solução (HORA, 2022). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), estima-se que são gerados anualmente 3 milhões de toneladas (Tabela 10) de lodos de estações de tratamento de esgoto (SNIS, 2023). Segundo Kończak et al (2021) biochars derivados de lodo de ETE adsorvem efetivamente ácidos fúlvicos de águas residuais (afetam a solubilidade de substâncias orgânicas e inorgânicas, além de possuírem capacidade de formar complexos com íons metálicos), tornando a pirólise dessa biomassa uma ferramenta valiosa para o gerenciamento de resíduos orgânicos (KOŃCZAK et al., 2021). Outro estudo, de Zhang et al. (2020) verificaram que o biochar proveniente de resíduos lodo de ETE remove efetivamente o diclofenaco (medicamento anti-inflamatório não esteroide) da água, proporcionando uma solução verde e ecológica para a remoção deste medicamento que pode ser tóxico aos organismos aquáticos (ZHANG et al., 2020). Nesse sentido, o biochar derivado do lodo de ETE apresenta-se como uma solução importante, pois não apenas sequestra carbono, mitigando as emissões de gases de efeito estufa, mas também melhora a qualidade do solo, promovendo a retenção de nutrientes e aumentando a eficiência hídrica em práticas agrícolas, bem como redução da absorção de metais pesados, resultando em benefícios ambientais e agronômicos (SINGH et al., 2020).

Figura 9 – Gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2020.



Fonte: ABRELPE, 2020.

A geração e o acúmulo de resíduos sólidos urbanos no Brasil têm se mostrado maiores com o passar do tempo, com uma taxa de crescimento estimada em 7% por ano (MULATINHO et al., 2022). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), foi gerado, em 2022, 81,8 milhões de toneladas de resíduos (ABRELPE, 2022). Na figura 9 é apresentada a gravimetria dos resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2020). Para a produção de biochar poderiam ser utilizados as frações de matéria orgânica, papel e papelão, totalizando 55,7%, o que equivale a 45,2 milhões de toneladas por ano (Tabela 10). Visto que no Brasil, atualmente, 15% da disposição final do solo é realizada em lixões (SNIS, 2023), esta parcela apresenta desafios significativos no que diz respeito aos efeitos ambientais e de saúde, pois contribui para a liberação de gases de efeito estufa e a contaminação do solo (GOUVEIA, 2012). Essa problemática impacta não apenas os lençóis freáticos, mas também representa potenciais fontes de doenças (MULATINHO et al., 2022). Segundo Sumalinog, Capareda e De Luna (2018) o biochar proveniente de resíduos sólidos urbanos remove efetivamente acetaminofeno (medicamento analgésico) e corante azul de metileno de águas contaminadas, alcançando uma remoção máxima de 99,9% sem alterações no pH (SUMALINOG; CAPAREDA; DE LUNA, 2018). Alguns estudos verificaram que a pirólise de resíduos sólidos municipais a temperaturas iguais ou superiores a 800 °C, por 4

minutos ou mais, resulta na produção de biochar com características de combustível semelhantes ao carvão antracito (componente com alto poder calorífico, produzindo uma quantidade significativa de calor quando queimado) sinalizando que essa biomassa produz um biochar com bom potencial energético (YAN et al., 2020). Dessa forma, o biochar produzido através da pirólise de resíduos sólidos urbanos apresenta-se como uma alternativa para o controle de possíveis contaminantes ambientais e com um bom potencial energético (ASHIQ et al., 2019).

Tabela 10 – Compilado de quantidade de resíduos gerados de acordo com o tipo de matéria-prima.

Matéria-prima	Quantidade de resíduos gerado (Mton/ano)	Referência
Agropastoris (Agricultura)	850,1	(IBGE, 2022)
Agropastoris (Pecuária)	1.202,8	
Florestais	118,7	(IBGE, 2022)
Lodo de ETE	3,0	(SNIS, 2023)
Resíduos Sólidos Urbanos	45,2	(ABRELPE, 2022)
Total	2.219,8	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Diante deste cenário de geração de resíduos por diversas atividades e da possibilidade de produção de biochar, é possível fazer uma estimativa, grosso modo, da quantidade de biochar capaz de ser obtida. O rendimento médio do biochar é expresso como a proporção da massa de biochar produzida em relação à massa da biomassa inicial (FUNKE et al., 2018). No entanto, o rendimento real pode variar dependendo de vários fatores, incluindo o tipo de biomassa utilizada, o método de produção e as condições de pirólise (CROMBIE et al., 2015). Para estimativa do potencial produtivo brasileiro do biochar foi utilizado o rendimento médio de acordo com cada matéria-prima e, a partir do total da estimativa de resíduos gerados por ano da Tabela 10 (2.219,8 milhões de toneladas por ano) observa-se um potencial produtivo de biochar de aproximadamente 573,7 milhões de toneladas por ano (Tabela 11).

Tabela 11 – Compilado de rendimento de biochar de acordo com o tipo de matéria-prima.

Matéria-prima	Método de produção / Temperatura (°C)	Quantidade de resíduos gerado (Mton/ano)	Rendimento	Biochar gerado (Mton/ano)	Referência
Agropastoris (Agricultura)	Pirólise Rápida / 500	850,1	26%	221,0	(FUNKE et al., 2018)
Agropastoris (Pecuária)	Pirólise Rápida / 450	1.202,8	25,5%	306,7	(ZHOU et al., 2021)
Florestais	Pirólise Rápida / 450	118,7	18,5%	22,0	(ZHOU et al., 2021)
Lodo de ETE	Carbonização hidrotérmica / 180	3,0	66,2%	2,0	(PENG et al., 2016)
Resíduos Sólidos Urbanos	Carbonização hidrotérmica / 180	45,2	48,7%	22,0	(MERZARI et al., 2018)
Total				573,7	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Tabela 11 observa-se o potencial rendimento de biochar proveniente de resíduos agropastoris (527,7 milhões de toneladas por ano), um dos desafios para absorção desses resíduos pelas indústrias de biochar, seria a localização dessas empresas considerando as dimensões territoriais do Brasil. Refletindo sobre um cenário hipotético de um potencial produtivo de biochar de aproximadamente 573,7 milhões de toneladas por ano, e tomando por base a capacidade de produção maior de biochar do mundo (*Airex Energy* - capacidade de 30.000 toneladas por ano), há, hipoteticamente, mercado para instalação de 19.123 indústrias distribuídas pelo território brasileiro.

A avaliação técnico-econômica (ATE) é essencial para identificar a rentabilidade do processo de produção de biochar e trazê-lo ao mercado (SCOWN et al., 2021). Os custos operacionais, de coleta de matéria-prima, de equipamentos e de fabricação são características importantes de qualquer processo ou produto em termos de desempenho técnico e econômico (MAMADALIEVA N.A, 2020). A par destes custos, a eficiência energética é sempre um fator

crucial na determinação da viabilidade econômica do processo (CAMPBELL et al., 2018). Segundo Kumar, Saini e Bhaskar (2020) a ATE mostrou que o design otimizado do processo (boa qualidade da matéria-prima para gerar subprodutos com propriedades físico-químicas superiores) desempenha um papel significativo na melhoria da eficiência econômica das metodologias de produção de biochar (KUMAR; SAINI; BHASKAR, 2020). Da mesma maneira, Campbell et al. (2018) observaram que a produção apenas de biochar oferece um empreendimento potencialmente lucrativo, tendo em vista os preços de mercado do biocombustível (um dos subprodutos da pirólise de biomassa) (CAMPBELL et al., 2018). Logo, o biochar emerge como uma solução promissora para abordar preocupações ambientais, especialmente considerando a ATE, a qual impulsiona novas pesquisas à medida que a interseção entre a sustentabilidade ambiental e a rentabilidade econômica posiciona o biochar como uma opção estratégica.

As indústrias brasileiras têm empregado a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para examinar os aspectos ambientais ligados às diferentes fases de fabricação, utilização e destino de bens ou serviços industriais e agrícolas (CLAUDINO; TALAMINI, 2013). A ACV é uma metodologia que avalia sistematicamente os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de todas as suas fases, desde a extração de matérias-primas até o descarte final (NGABUK; IMMANUEL; IRAWATI, 2022). No contexto do biochar, esta abordagem é importante para compreender os efeitos ambientais associados à produção, transporte, aplicação e eventual disposição desse material carbonáceo. Conforme Marzeddu et al. (2021) a aplicação de biochar no solo oferece benefícios significativos ao longo do ciclo de vida do composto carbonáceo, proporcionando benefício ambiental, principalmente devido ao armazenamento de carbono nos solos (MARZEDDU et al., 2021). Embora estudos existentes sugiram que a produção de biochar a partir de resíduos geralmente contribui para a mitigação das mudanças climáticas (MATUŠTÍK; POHOŘELÝ; KOČÍ, 2022; NGABUK; IMMANUEL; IRAWATI, 2022), as diferenças metodológicas da ACV impactam a avaliação ambiental global, necessitando ainda de maiores pesquisas.

5.4 BIOCHAR E OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Com o avanço da ciência e tecnologia, não apenas a velocidade da vida aumentou, mas o nível de conforto também cresceu significativamente, e os efeitos negativos desse crescimento

e desenvolvimento estão se tornando evidentes. Tais resultados indesejáveis incluem alterações climáticas, contaminação do solo, poluição da água, geração de resíduos, esgotamento de combustíveis fósseis, escassez de alimentos etc. (KUMAR; BHATTACHARYA, 2021). Por esta razão, foram estabelecidas metas de desenvolvimento sustentável para lidar com várias questões sociais, econômicas e ambientais (UNITED NATIONS, 2015).

Os ODS são um conjunto de 17 alvos, elaborados pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 2015, para lidar com questões ambientais, econômicas e sociopolíticas. As metas foram subdivididas em 169 objetivos, e um prazo foi estipulado para alcançá-los, de até 2030 (UNITED NATIONS, 2015). A conquista dessas metas será crucial para preservar o planeta das ameaças que continuamente prejudicam o meio ambiente (KUMAR; BHATTACHARYA, 2021). Nesse sentido, tecnologias que tenham potencial de contribuir com o alcance dos ODS são fundamentais. No caso do biochar, é possível apontar a sua possibilidade de contribuição em relação a alguns ODS, conforme abordado nas seções a seguir.

5.4.1 Contribuição do biochar para a gestão sustentável da água (ODS 6)

Os impactos das mudanças climáticas, urbanização e crescimento populacional têm criado desafios significativos na gestão dos recursos hídricos (RAMOS et al., 2019). Para enfrentar esses desafios e alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável, é essencial avaliar as condições futuras dos recursos hídricos sob cenários projetados de mudanças climáticas (RISLEY; ZAMMIT, 2023). Isso possibilitará o desenvolvimento de melhores sistemas de gestão de água e estratégias de adaptação climática que contribuirão para alcançar os ODS até 2030 (UNITED NATIONS, 2015).

A estrutura porosa do biochar permite que este material atue como uma esponja, atraindo e retendo água no solo, ajudando a melhorar a retenção de umidade especialmente em regiões propensas à seca (LIU et al., 2017). Além disso, o biochar também melhora a infiltração de água e reduz a erosão ao melhorar a estrutura do solo (GLASER et al., 2002). O biochar tem um efeito a longo prazo na gestão da água em sistemas agrícolas, pois sua capacidade de absorver e armazenar água pode reduzir a necessidade de irrigação, contribuindo assim para a conservação dos recursos hídricos (GLASER et al., 2002). O estudo de Mao, Zhang e Chen (2019) observou que a adição de biochar ao solo pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água no solo (MAO; ZHANG; CHEN, 2019). Isso ajuda a manter um nível de

umidade do solo mais consistente, reduzindo o estresse nas culturas e promovendo um crescimento saudável (GLASER et al., 2002).

O biochar também pode desempenhar um papel na redução da lixiviação de nutrientes e na melhoria da fertilidade do solo (TSAI et al., 2013). Quando aplicado ao solo, o biochar atua como um agente de calagem, neutralizando solos ácidos e criando um ambiente mais favorável para a absorção de nutrientes pelas plantas (JATAV et al., 2021). Sua capacidade de reter nutrientes também evita que sejam carregados pela chuva ou irrigação, reduzindo o risco de poluição de fontes de água superficial e subterrânea (JATAV et al., 2021). Além disso, o biochar também pode contribuir para a gestão sustentável da água, reduzindo a erosão e melhorando a infiltração de água (HOSSAIN et al., 2020). Um estudo verificou que o biochar produzido através de biomassa florestal (salgueiro) possui poros internos com tamanhos entre 50 e 10 μm e, se aplicado ao solo, aumentaria a porosidade do solo e a quantidade de água prontamente disponível para as plantas (RASA et al., 2018). Após análise em tomografia de raios X e microscopia de íons de hélio do biochar de salgueiro (Figura 9), foi constatado alterações na porosidade do solo em regimes de tamanho de poro de 5 a 10 e 25 μm , ou seja, tamanhos de poros de biochar multiplicados pelo fator 0,5, destacando o papel dos poros do biochar em escala micrométrica na retenção de água no solo (RASA et al., 2018).

O manejo inadequado das águas pluviais nas áreas urbanas representa um desafio significativo para a sustentabilidade ambiental. O escoamento de águas pluviais em excesso pode levar à erosão do solo, à contaminação da água e ao sobrecarregamento dos sistemas de drenagem, resultando em inundações e danos à infraestrutura urbana (MCDONNELL et al., 2020). A estrutura porosa do biochar pode atuar como uma barreira física, impedindo que partículas do solo sejam levadas pela erosão da água (AJENG et al., 2020). O estudo de Garg et al. (2022) desenvolveu um modelo baseado em Rede Neural Artificial para prever a taxa total de erosão e a taxa total de fluxo de água de solos adubados com biochar, e observou uma diminuição na taxa de erosão em 33% (para comprimento de encosta de 2 m) com 5% de adubação do solo com biochar.

A falta de práticas eficientes de gerenciamento de águas pluviais também pode contribuir para a escassez de água e a degradação da sua qualidade, prejudicando os ecossistemas locais e a saúde pública (MALAVIYA; SINGH, 2012). Diante desse cenário, a implementação de infraestruturas verdes, incluindo o uso estratégico de biochar, emerge como uma solução promissora para mitigar os impactos negativos do escoamento de águas pluviais e

promover um ambiente urbano mais sustentável e resiliente (DHAKAL; CHEVALIER, 2017). Estudos têm demonstrado que a incorporação de biochar em sistemas de infraestrutura verde, como jardins no telhado (Figura 10), pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água do solo, melhorar as taxas de infiltração de águas pluviais (CHEN et al., 2018) e indiretamente melhorar a qualidade do ar através das plantas (HU; CHEN, 2022).

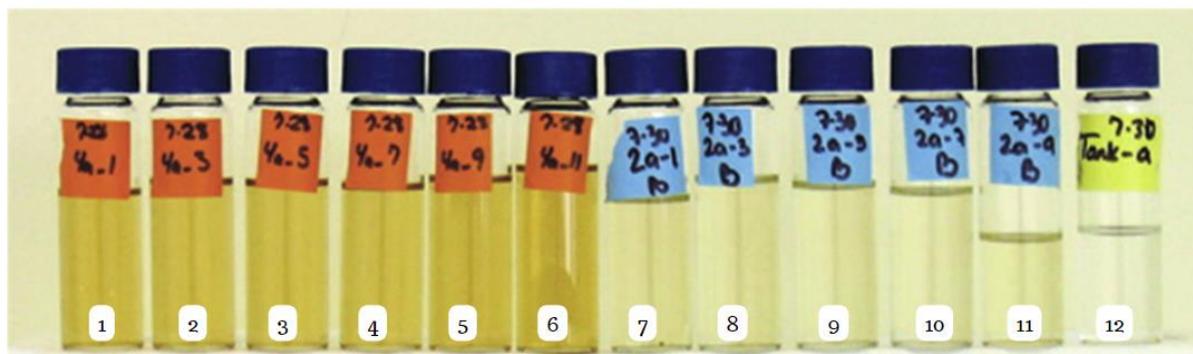
Figura 10 – Exemplos de telhado verde. A imagem “A” está localizada na cidade de Milwaukee, Wisconsin, United States, com instalação do telhado em maio de 2009. Já a Imagem “B” localiza-se em Pickering, Ontario, Canada, com instalação em julho de 2014.



Fonte: LiveRoof Green Roof Systems - Natural Function, Natural Beauty, 2023.

Com a finalidade de avaliar as mudanças na qualidade e quantidade de água em telhados verdes após a adição de biochar, Beck, Johnson e Spolek (2011) desenvolveram protótipos de telhado verde com e sem biochar em bandejas, os quais foram submetidas a dois eventos sequenciais de chuva (7,4 cm/h, por 30 minutos) e o escoamento dos eventos de chuva foi coletado e avaliado (Figura 11). Foi concluído que as bandejas contendo 7% de biochar no solo apresentaram aumento na retenção de água e reduções significativas na descarga de nitrogênio total, fósforo total, nitrato, fosfato e carbono orgânico, sugerindo que a adição de biochar ao solo do telhado verde melhora a qualidade e a retenção da água de escoamento (BECK; JOHNSON; SPOLEK, 2011).

Figura 11 - Amostras de escoamento de chuva de bandejas provenientes do estudo de Beck, Johnson e Spolek (2011). Foi identificada a diferença de cor entre amostras de escoamento coletadas do controle (amostras 1 a 6), solo biochar (amostras 7 a 11) e água que foi utilizada nos eventos sequenciais de chuva (amostra 12).



Fonte: Adaptado de Beck, Johnson e Spolek (2011).

5.4.2 Transição para energia limpa e renovável (ODS 7)

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 - Energia Acessível e Limpa, é fundamental não apenas para mitigar as mudanças climáticas, mas também para garantir a segurança energética a longo prazo e melhorar a qualidade do ar (VASILAKOS et al., 2022). Para alcançar essa transição de forma eficaz, é possível considerar a utilização do biochar, uma forma de biomassa carbono-negativa e sustentável (WAQAS et al., 2018).

A energia produzida sob forma de calor durante o processo de produção de biochar pode ser capturada e utilizada eficientemente com o aquecimento de instalações ou geração de eletricidade, contribuindo ainda mais para o objetivo de alcançar energia limpa e renovável (KANT BHATIA et al., 2021). Yousaf et al. (2017) utilizaram biochar produzido a partir de casca de amendoim e palha de trigo a 300, 500 e 700 °C (queimados sozinhos e misturados com carvão em proporções de massa de 20% e 50%). A combustão foi sistematicamente investigada quanto ao potencial de redução das emissões de elementos potencialmente tóxicos (As, Ba, Cd, Co, Ni, Pb, Sb, Sn entre outros). Os resultados indicaram que os combustíveis misturados com biochar em proporções iguais apresentaram aumento da eficiência da combustão e na melhoria das características térmicas em comparação com os combustíveis de carvão. Além disso, o rendimento de fuligem, a emissão de CO e o carbono não queimado nas cinzas foram reduzidos significativamente nos combustíveis misturados com biochar, e o potencial de volatilização dos

elementos potencialmente tóxicos durante a combustão do biochar e suas misturas com carvão diminuiu até 21% em comparação com o carvão (YOUSAF et al., 2017).

No estudo de Waqas et al (2018), o qual objetivou converter resíduos agrícolas em biochar através da pirólise, foi examinado o poder calorífico do biochar. Os resultados do poder calorífico dos biochars produzidos a 250, 350 e 450 °C foram 24 MJ/kg, 23,64 MJ/kg e 23,08 MJ/kg, respectivamente, sinalizando potenciais energéticos consideravelmente altos (WAQAS et al., 2018). Com relação aos combustíveis fósseis, o valor calorífico dos bio-óleos produzidos com metanol e etanol chegam a 37,69 MJ/kg e 38,42 MJ/kg, respectivamente (HUANG et al., 2014), enquanto o da gasolina pode ser considerado aproximadamente 47 MJ/kg (RAHMAN; AUNG, 2018). Com isso, pode identificar o potencial energético apresentado pelo biochar, tornando-o uma estratégia promissora para alcançar o ODS 7, proporcionando energia limpa e renovável, com benefícios adicionais na redução de emissões e melhoria das características térmicas em comparação com combustíveis fósseis convencionais.

5.4.3 Redução da pegada de carbono e impactos no ODS 13

O ODS 13 refere-se à "Ação contra a mudança global do clima", visando combater os impactos das alterações climáticas (UNITED NATIONS, 2015). Assim, a comunidade global tem se comprometido a adotar estratégias sustentáveis para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promover energias renováveis, além de implementar políticas e práticas que garantam a adaptação e a resiliência diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas (KABEYI; OLANREWAJU, 2022).

Para atingir esse objetivo desafiador, são necessárias tecnologias eficientes de remoção de CO₂. O biochar tem sido reconhecido como uma tecnologia promissora para contribuir com a mitigação das mudanças climáticas e alcançar as metas do ODS 13 (WAQAS et al., 2018). Transformar biomassa em biochar, em vez de permitir sua decomposição natural no solo, oferece uma abordagem eficaz para diminuir as emissões de CO₂ e metano, contribuindo assim para a mitigação dos impactos ambientais associados à decomposição da biomassa (GROSS; BROMM; GLASER, 2021). Sua aplicação no solo pode sequestrar carbono a longo prazo, reduzindo a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (AVISO et al., 2018). Esse processo de armazenamento de carbono orgânico no solo (COS), mais conhecido como sequestro de COS, descreve como o carbono orgânico é incorporado nos solos e convertido em

um *pool* de C de longa duração que, de outra forma, seria emitido como CO₂ (LAL, 2008). O sequestro de COS não apenas é considerado uma tecnologia eficiente de remoção de CO₂, mas também melhora a qualidade do solo e, portanto, aprimora as funções e serviços do ecossistema, a segurança alimentar e a resiliência às mudanças climáticas (RUMPEL et al., 2020).

Aumentos de estoques de COS podem ser alcançados usando diferentes estratégias, como redução do cultivo do solo (SCHLESINGER; AMUNDSON, 2019), agricultura orgânica (GATTINGER et al., 2012), agrofloresta (DE STEFANO; JACOBSON, 2018) e aditivos para o solo, como palha, lodo de esgoto ou esterco (GROSS; BROMM; GLASER, 2021). No entanto, as estratégias diferem significativamente na quantidade de carbono armazenado e na natureza de longo prazo, com a agrofloresta mostrando o maior potencial (GATTINGER et al., 2012). Os aditivos do solo precisam ser aplicados regularmente (por exemplo, no início de uma estação de cultivo) para armazenar C a longo prazo (GROSS; GLASER, 2021). Por outro lado, a aplicação de biochar tem um alto potencial de sequestro de COS a longo prazo devido à sua alta estabilidade e potencial de produção em grande escala, que é limitado apenas pela disponibilidade de biomassa (AZZI; KARLTUN; SUNDBERG, 2021). A aplicação estratégica do biochar no solo, destacada pela sua eficácia no sequestro de carbono orgânico de longa duração, não apenas contribui para a mitigação das mudanças climáticas, alinhando-se ao ODS 13, mas também promove melhorias na qualidade do solo, serviços ecossistêmicos e resiliência frente aos desafios climáticos, oferecendo uma solução sustentável e eficiente para enfrentar os impactos das alterações ambientais.

5.4.4 Contribuição do biochar para a biodiversidade (ODS 15)

O biochar desempenha um papel crucial na promoção da biodiversidade, alinhando-se de maneira significativa com a meta do ODS 15, que busca proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres (UNITED NATIONS, 2015). O biochar cria um ambiente propício para microrganismos benéficos e, por consequência, favorecendo a diversidade de espécies no ecossistema (LIU et al., 2016). A estrutura porosa do biochar e sua área superficial proporcionam um habitat propício para a colonização de microrganismos benéficos no solo (WONG; OGBONNAYA, 2021). Essa característica promove a formação de biofilmes e a proliferação de comunidades microbianas diversificadas, que são essenciais para a promoção da saúde do solo e a ciclagem de nutrientes (DE MEDEIROS et al., 2021).

Hoje em dia, os biofertilizantes são bem conhecidos como substitutos dos fertilizantes químicos, a fim de suprimir os riscos ambientais e aumentar a fertilidade do solo e o rendimento do produto (WU et al., 2005). Além disso, a fim de cumprir o propósito de aumentar a população e as atividades benéficas dos microrganismos do solo, o uso de biofertilizantes microbianos ou microrganismos promotores do crescimento de plantas fornece às plantas os elementos nutricionais necessários, como nitrogênio e fósforo, pelos quais o crescimento e o rendimento dos produtos poderiam ser melhorados (HOSSEINI et al., 2021).

O biochar retém e troca nutrientes, oferecendo um suprimento estável de elementos essenciais para o crescimento e atividade microbiana (POKHAREL; ACHARYA; FAROOQUE, 2020). Esse aspecto contribui para a presença de uma ampla gama de microrganismos que participam da ciclagem de nutrientes e do equilíbrio do ecossistema do solo (HOU et al., 2021). Hosseini et al (2021) verificou que aplicação de 2% de biochar no solo aumentou significativamente a colonização microbiana nas raízes (32,3%), a absorção de nutrientes dos grãos de N, P, Zn e Cu (10%, 10%, 10% e 4,3%, respectivamente), o rendimento biológico (5,08%), a respiração microbiana do solo (11,3%) e o carbono da biomassa microbiana (12,7%) em comparação com o controle, concluindo que a aplicação simultânea de microrganismos promotores de crescimento de plantas e biochar tem efeitos positivos, sendo considerada uma estratégia promissora (HOSSEINI et al., 2021).

Outra forma pela qual o biochar promove um ambiente favorável para microrganismos benéficos é por meio da regulação do pH do solo (CHEN et al., 2021). Essa regulação cria um ambiente mais propício para determinados microrganismos, que prosperam em condições específicas de pH, contribuindo para o equilíbrio e a diversidade da comunidade microbiana (LIU et al., 2022). Segundo Liu et al. (2019), a adição de biochar aumentou o pH do solo em 0,2 a 0,8, além de aumentar os teores de NH_4^+ (cátion amônio) e NO_3^- (nitratos) do solo de 21,1% para 32,5% e 63,0% para 176,0%, respectivamente (LIU et al., 2019), concluindo que a aplicação de biochar pode influenciar positivamente os microrganismos envolvidos na desnitrificação do solo, alterando as propriedades do pH solo e a lixiviação de NH_4^+ e NO_3^- . O biochar, portanto, ao promover a biodiversidade e criar um ambiente propício para microrganismos benéficos, atua como um aliado essencial na consecução das metas do ODS 15, contribuindo para a proteção, restauração e uso sustentável dos ecossistemas terrestres. Além disso, sua capacidade de aumentar a retenção de nutrientes e regulação do pH do solo

evidencia sua eficácia na promoção da saúde do solo e na melhoria do rendimento agrícola (HOSSAIN et al., 2020).

6 CONCLUSÃO

Em conclusão, esta revisão bibliográfica ofereceu uma análise abrangente dos avanços científicos e industriais relacionados ao biochar, destacando sua possibilidade de produção no contexto brasileiro e seu papel no desenvolvimento sustentável. Ao abordar questões específicas, desde os processos de produção até as possíveis contribuições para os ODS, este estudo buscou proporcionar uma compreensão holística do biochar e seu impacto global.

Os resultados revelaram um aumento notável na produção de conhecimento nos últimos anos, principalmente a partir de 2020, refletindo o crescente interesse e importância atribuída ao biochar como uma solução ambientalmente favorável. A análise dos artigos publicados destacou a liderança da China, Índia e Estados Unidos da América na pesquisa sobre biochar, ressaltando a necessidade de uma colaboração internacional mais estreita para abordar os desafios globais.

O mercado global de biochar está em ascensão, com crescente produção e diversificação de aplicações. A forte presença na China, rápido crescimento na Europa e América do Norte, refletem o papel central do biochar na economia global, impulsionado por sua contribuição para a sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas. A compilação das principais indústrias de biochar no mundo proporciona uma visão valiosa para pesquisadores e profissionais, destacando áreas de interesse e métodos de produção.

No contexto brasileiro, a pesquisa identificou um vasto potencial produtivo de biochar, especialmente ao utilizar resíduos vastamente disponíveis no país, como os agropastoris. No entanto, desafios como a obtenção de dados precisos sobre resíduos brasileiros e a limitada acessibilidade aos dados atualizados sobre produção em alguns países, representam áreas que necessitam de esforços futuros para aprofundar a compreensão e a aplicação do biochar.

O biochar emerge como uma tecnologia multifuncional, destacando-se em sua capacidade de contribuir para o alcance dos ODS, promovendo gestão sustentável da água, mitigação das mudanças climáticas, produção de energia limpa, sequestro de carbono, e promoção da biodiversidade, oferecendo soluções eficazes e sustentáveis para os desafios ambientais contemporâneos. Este estudo contribui significativamente para o conhecimento da comunidade científica, especialmente ao fornecer uma perspectiva única sobre o potencial do biochar no cenário brasileiro e ao consolidar informações sobre as principais indústrias globais.

Diante da abordagem aqui considerada, este trabalho sugere, portanto, algumas direções para futuras investigações, incluindo a avaliação mais aprofundada do potencial produtivo no Brasil e análises mais detalhadas das capacidades de produção das indústrias de biochar em nível internacional. Diante dos desafios ambientais globais, o emprego estratégico do biochar revela-se como uma ferramenta versátil e promissora, capaz de aliar avanços tecnológicos à preservação do meio ambiente, oferecendo soluções inovadoras para enfrentar as complexidades da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-FATTAH, T. M. et al. Biochar from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 22, n. 25, p. 103–109, 2015.
- ABHIJEET, A. et al. Assessment of Sugarcane Residues Derived Biochar for Carbon Sequestration in the Soil in India. **Energy proceeding**, v. 25, 2022.
- ABRELPE. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2020**. 2020.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2022**. 2022.
- ADENIYI, A. G.; IGHALO, J. O.; ONIFADE, D. V. Biochar from the Thermochemical Conversion of Orange (*Citrus sinensis*) Peel and Albedo: Product Quality and Potential Applications. **Chemistry Africa**, v. 3, n. 2, p. 439–448, 1 jun. 2020.
- ADENIYI, A. G.; IGHALO, J. O.; ONIFADE, D. V. Production of biochar from elephant grass (*Pennisetum purpureum*) using an updraft biomass gasifier with retort heating. **Biofuels**, v. 12, n. 10, p. 1283–1290, 2021.
- AGARWAL, H. et al. Biochar-based fertilizers and their applications in plant growth promotion and protection. **3 Biotech**, v. 12, p. 123–136, 2022.
- AHMAD, M. et al. Speciation and phytoavailability of lead and antimony in a small arms range soil amended with mussel shell, cow bone and biochar: EXAFS spectroscopy and chemical extractions. **Chemosphere**, v. 95, p. 433–441, 1 Jan. 2014.
- AJENG, A. et al. Bioformulation of biochar as a potential inoculant carrier for sustainable agriculture. **Environmental Technology & Innovation**, v. 20, 2020.
- AKDENIZ, N. A systematic review of biochar use in animal waste composting. **Waste Management**, v. 88, p. 291–300, 1 abr. 2019.
- AL ARNI, S. Comparison of slow and fast pyrolysis for converting biomass into fuel. 2017.
- ALMEIDA, M. C. Potencial Energético de Resíduos Florestais do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira. **Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia**, out. 2018.
- AMORIM, E. P.; PIMENTA, A. S.; SOUZA, E. C. DE. Aproveitamento dos resíduos da colheita florestal: estado da arte e oportunidades. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e4410212175, 3 fev. 2021.
- ANZBIG. **Australian Biochar Industry 2030 ROADMAP**. 2023.

ARRIOLA, E. et al. Impact of post-torrefaction process on biochar formation from wood pellets and self-heating phenomena for production safety. **Energy**, v. 207, p. 118324, 15 set. 2020.

ASHIQ, A. et al. Sorption process of municipal solid waste biochar-montmorillonite composite for ciprofloxacin removal in aqueous media. **Chemosphere**, v. 236, 1 dez. 2019.

AVISO, K. et al. P-graph approach to planning biochar-based carbon management networks. **Chemical engineering transactions**, v. 70, p. 37–42, 2018.

AZAD, D. et al. Biological Treatment for Biochar Modification: Opportunities, Limitations, and Advantages. **Engineered Biochar: Fundamentals, Preparation, Characterization and Applications**, p. 85–104, 1 jan. 2022.

AZZI, E. S.; KARLTUN, E.; SUNDBERG, C. Small-scale biochar production on Swedish farms: A model for estimating potential, variability, and environmental performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124873, 20 jan. 2021.

BAI, Z. et al. Relocate 10 billion livestock to reduce harmful nitrogen pollution exposure for 90% of China's population. **Nature Food** 2022 3:2, v. 3, n. 2, p. 152–160, 10 fev. 2022.

BARRACOSA, P. et al. Effect of Biochar on Emission of Greenhouse Gases and Productivity of Cardoon Crop (*Cynara cardunculus* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 3, p. 1524–1531, 1 set. 2020.

BASU, P. Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: Practical design and theory. 2018.

BATISTA, E. M. C. C. et al. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018.

BECK, D. A.; JOHNSON, G. R.; SPOLEK, G. A. Amending green roof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 8–9, p. 2111–2118, 1 ago. 2011.

BHATTA KAUDAL, B.; APONTE, C.; BRODIE, G. Biochar from biosolids microwaved-pyrolysis: Characteristics and potential for use as growing media amendment. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 130, p. 181–189, 1 mar. 2018.

BHATTACHARYYA, P. et al. Turn the wheel from waste to wealth: Economic and environmental gain of sustainable rice straw management practices over field burning in reference to India. **Science of The Total Environment**, v. 775, p. 145896, 25 jun. 2021.

BILLA, S. F.; ANGWAFO, T. E.; NGOME, A. F. Agro-environmental characterization of biochar issued from crop wastes in the humid forest zone of Cameroon. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 1 mar. 2019.

BOLAN, N. S.; ADRIANO, D. C.; MAHIMAIRAJA, S. Distribution and Bioavailability of Trace Elements in Livestock and Poultry Manure By-Products. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 34, n. 3, p. 291–338, 2004.

BORCHARD, N. et al. Physical activation of biochar and its meaning for soil fertility and nutrient leaching – a greenhouse experiment. **Soil Use and Management**, v. 28, n. 2, p. 177–184, 1 jun. 2012.

BRACHI, P. et al. Valorization of Orange Peel Residues via Fluidized Bed Torrefaction: Comparison between Different Bed Materials. **Combustion Science and Technology**, v. 191, n. 9, p. 1585–1599, 2 set. 2019.

CAI, N. et al. Biochar from Biomass Slow Pyrolysis. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 586, n. 1, 2 dez. 2020.

CALLEGARI, A.; CAPODAGLIO, A. G. Properties and Beneficial Uses of (Bio)Chars, with Special Attention to Products from Sewage Sludge Pyrolysis. **Resources 2018, Vol. 7, Page 20**, v. 7, n. 1, p. 20, 14 mar. 2018.

CAMPBELL, R. M. et al. Financial viability of biofuel and biochar production from forest biomass in the face of market price volatility and uncertainty. **Applied Energy**, v. 230, 2018.

CAO, Y. et al. Mitigating the global warming potential of rice paddy fields by straw and straw-derived biochar amendments. **Geoderma**, v. 396, p. 115081, 15 ago. 2021.

CAVALI, M. et al. A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization, and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. 2022.

CERVEN, V. et al. The Occurrence of Legacy P Soils and Potential Mitigation Practices Using Activated Biochar. **Agronomy journal**, v. 11, n. 7, p. 1–11, 1 jul. 2021.

CHAN, K. Y. et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, v. 45, n. 8, p. 629–634, 2007.

CHEN, G. et al. Evaluating the impact of biochar on biomass and nitrogen use efficiency of sugarcane using ¹⁵N tracer method. **Frontiers in Agronomy**, v. 4, 26 set. 2022.

CHEN, H. et al. Biochar increases plant growth and alters microbial communities via regulating the moisture and temperature of green roof substrates. **The Science of the total environment**, v. 635, p. 333–342, 1 set. 2018.

CHEN, H. et al. Biochar Improves Sustainability of Green Roofs via Regulate of Soil Microbial Communities. **Agriculture**, v. 11, n. 7, 1 jul. 2021.

CHEN, L. et al. Sustainable stabilization/solidification of municipal solid waste incinerator fly ash by incorporation of green materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 335–343, 10 jun. 2019a.

CHEN, W. et al. Past, present, and future of biochar. **Biochar**, 2019b.

CHENG, S. et al. Application Research of Biochar for the Remediation of Soil Heavy Metals Contamination: A Review. **Molecules** **2020**, Vol. **25**, Page **3167**, v. 25, n. 14, p. 3167, 10 jul. 2020.

CHO, D. W. et al. Simultaneous production of syngas and magnetic biochar via pyrolysis of paper mill sludge using CO₂ as reaction medium. **Energy Conversion and Management**, v. 145, p. 1–9, 1 ago. 2017.

CHO, D. W. et al. Fabrication and environmental applications of multifunctional mixed metal-biochar composites (MMBC) from red mud and lignin wastes. **Journal of hazardous materials**, v. 374, p. 412–419, 15 jul. 2019.

CLAUDINO, E. S.; TALAMINI, E. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, 2013.

CLEMENTE, A. M. et al. Spatial-Temporal Patterns of Bean Crop in Brazil over the Period 1990–2013. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 4, 1 abr. 2017.

CROMBIE, K. et al. Biochar – synergies and trade-offs between soil enhancing properties and C sequestration potential. **GCB Bioenergy**, v. 7, n. 5, p. 1161–1175, 1 set. 2015.

CZECH, B. et al. Engineered biochars from organic wastes for the adsorption of diclofenac, naproxen and triclosan from water systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125686, 15 mar. 2021.

DĄBROWSKA, M. et al. Valuable energy of biochar from agricultural and forest waste streams. p. 256–260, 16 mar. 2018.

DALAHMEH, S. et al. Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm. **Science of the Total Environment**, v. 612, 2018.

DE ALMEIDA, S. G. C. et al. Biochar production from sugarcane biomass using slow pyrolysis: Characterization of the solid fraction. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 179, p. 109054, 1 set. 2022.

DE, H. et al. ASPECTOS TÉCNICOS DO PROCESSO DE PIRÓLISE. **Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências**, 2022.

DE MEDEIROS, E. V. et al. Biochar as a strategy to manage plant diseases caused by pathogens inhabiting the soil: a critical review. **Phytoparasitica**, v. 49, n. 4, p. 713–726, 1 set. 2021.

DE PRETTO, C. et al. Possibilities for Producing Energy, Fuels, and Chemicals from Soybean: A Biorefinery Concept. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 10, p. 1703–1730, 1 out. 2018.

DE STEFANO, A.; JACOBSON, M. G. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 285–299, 1 abr. 2018.

DHAKAL, K. P.; CHEVALIER, L. R. Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. **Journal of environmental management**, v. 203 Pt 1, p. 171–181, 1 dez. 2017.

DIAS, M. O. S. et al. Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. **Applied Energy**, v. 109, p. 72–78, 1 set. 2013.

DRAPER, K et al. **Survey and Analysis of the US Biochar Industry**. 2018.

DRECHSEL, P.; QADIR, M.; WICHELNS, D. Wastewater: economic asset in an urbanizing world. 2015.

DU, Z. et al. Fast microwave-assisted preparation of a low-cost and recyclable carboxyl modified lignocellulose-biomass jute fiber for enhanced heavy metal removal from water. **Bioresource Technology**, v. 201, p. 41–49, 1 fev. 2016.

DUAN, C. et al. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. **Journal of Water Process Engineering**, 2020.

EBI. **Beyond Carbon Sequestration: The Wide-Ranging Applications of Biochar**. Disponível em: <<https://www.biochar-industry.com/2023/2023-biochar-use-cases/>>. Acesso em: 12 nov. 2023a.

EBI. **European Biochar Market Report 2022 | 2023**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2023/03/European-Biochar-Market-Report_20222023.pdf>. Acesso em: 3 out. 2023b.

FACHINI, J. et al. One Year Residual Effect of Sewage Sludge Biochar as a Soil Amendment for Maize in a Brazilian Oxisol. 2021.

FAN, S. et al. Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge-derived biochar: Adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics, and mechanism. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 5, n. 1, p. 601–611, 1 fev. 2017.

FERREIRA-LEITAO, V. et al. Biomass residues in Brazil: Availability and potential uses. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 65–76, 7 mar. 2010.

FOONG, S. Y. et al. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions. **Chemical Engineering Journal**, v. 389, p. 124401, 1 jun. 2020.

FUNGO, B. et al. N₂O and CH₄ emission from soil amended with steam-activated biochar. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 1, p. 34–38, 1 fev. 2014.

FUNKE, A. et al. Application of fast pyrolysis char in an electric arc furnace. **Fuel Processing Technology**, v. 174, p. 61–68, 1 jun. 2018.

GAO, Y. et al. Biochar as a potential strategy for remediation of contaminated mining soils: Mechanisms, applications, and future perspectives. **Journal of Environmental Management**, 2022.

GARCIA, B. et al. Biochar: Production, Applications, and Market Prospects in Portugal. **Environments 2022, Vol. 9, Page 95**, v. 9, n. 8, p. 95, 27 jul. 2022.

GARCÍA-CONDADO, S. et al. Assessing lignocellulosic biomass production from crop residues in the European Union: Modelling, analysis of the current scenario and drivers of interannual variability. **GCB Bioenergy**, v. 11, n. 6, p. 809–831, 1 jun. 2019.

GARCIA-NUNEZ, J. A. et al. Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review. **Energy and Fuels**, v. 31, n. 6, p. 5751–5775, 15 jun. 2017.

GATTINGER, A. et al. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, n. 44, p. 18226–18231, 30 out. 2012.

GHODAKE, G. S. et al. Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, 15 maio 2021.

GLASER, B. et al. The “Terra Preta” phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, 2001.

GLASER, B. et al. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. **SpringerB Glaser, J Lehmann, W ZechBiology and fertility of soils, 2002•Springer**, v. 35, n. 4, p. 219–230, 2002.

GLASER, B. et al. Biochar is carbon negative. **Nature Geoscience 2009 2:1**, v. 2, n. 1, p. 2–2, jan. 2009.

GODLEWSKA, P. et al. Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review. **Bioresource Technology**, v. 246, p. 193–202, 1 dez. 2017.

GOMES, J. DA C. Formação de multiplicadores para reciclagem de resíduos orgânicos por meio da compostagem em tempos de pandemia. **Revista ELO – Diálogos em Extensão**, v. 10, 26 abr. 2021.

GÓMEZ, L. D. et al. Valorising faba bean residual biomass: Effect of farming system and planting time on the potential for biofuel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 227–232, 1 dez. 2017.

GONZAGA, M. I. S.; SOUZA, D. C. F. DE; SANTOS, J. C. DE J. Use of organic waste biochar as an innovative alternative for increasing agricultural productivity in small rural communities. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. e8910413848–e8910413848, 1 abr. 2021.

GONZALEZ, P. G. A. et al. Soybean Straw as a Feedstock for Value-Added Chemicals and Materials: Recent Trends and Emerging Prospects. **BioEnergy Research** 2022 **16:2**, v. 16, n. 2, p. 717–740, 1 set. 2022.

GONZÁLEZ-PERNAS, F. M. et al. Effects of Biochar on Biointensive Horticultural Crops and Its Economic Viability in the Mediterranean Climate. **Energies** 2022, **Vol. 15**, **Page 3407**, v. 15, n. 9, p. 3407, 6 maio 2022.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1503–1510, jun. 2012.

GROSS, A.; BROMM, T.; GLASER, B. Soil organic carbon sequestration after biochar application: A global meta-analysis. **Agronomy**, v. 11, n. 12, p. 2474, 1 dez. 2021.

GROSS, A.; GLASER, B. Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage. **Scientific Reports** 2021 **11:1**, v. 11, n. 1, p. 1–13, 9 mar. 2021.

GUENET, B. et al. Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? **Global Change Biology**, v. 27, n. 2, p. 237–256, 1 jan. 2021.

GUPTA, S. et al. Latest trends in heavy metal removal from wastewater by biochar-based sorbents. **Journal of water process engineering**, v. 38, 1 dez. 2020.

GWENZI, W. et al. Biochars as media for air pollution control systems: Contaminant removal, applications, and future research directions. **Science of the Total Environment**, 2021.

HAMAWAND, I. et al. Bioenergy from Cotton Industry Wastes: A review and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 435–448, 1 dez. 2016.

HAMEDI, J.; DEHHAGHI, M.; MOHAMMDIPANAH, F. Isolation of extremely heavy metal resistant strains of rare actinomycetes from high metal content soils in Iran. **International Journal of Environmental Research**, v. 9, n. 2, 2015.

HE, M. et al. Waste-derived biochar for water pollution control and sustainable development. **Nature Reviews Earth & Environment**, 2022.

HEIDARI, M. et al. Development of a mathematical model for hydrothermal carbonization of biomass: Comparison of experimental measurements with model predictions. **Energy**, v. 214, p. 119020, 1 jan. 2021.

HERNÁNDEZ, J. J. et al. Recirculation of char from biomass gasification: Effects on gasifier performance and end-char properties. **Renewable Energy**, v. 147, p. 806–813, 1 mar. 2020.

HLAVÁČIKOVÁ, H. et al. Two types of biochars: one made from sugarcane bagasse, other one produced from paper fiber sludge and grain husks and their effects on water retention of a clay, a loamy soil and a silica sand. **Soil and Water Research**, v. 14, n. 2, p. 67–75, 2019.

HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, 2009.

HORA, I. B. Produção e uso do biocarvão de lodo de esgoto no Brasil : uma revisão sistemática. 8 jun. 2022.

HOSSAIN, M. Z. et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. **Biochar**, v. 2, n. 4, p. 379–420, 1 dez. 2020.

HOSSAIN, M. Z. et al. Assessment of the fertilizer potential of biochars produced from slow pyrolysis of biosolid and animal manures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 155, p. 105043, 1 maio 2021.

HOSSEINI, E. et al. Do bagasse biochar and microbial inoculants positively affect barley grain yield and nutrients, and microbial activity? **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 4, p. 522–539, 16 dez. 2021.

HOU, Q. et al. Responses of nitrification and bacterial community in three size aggregates of paddy soil to both of initial fertility and biochar addition. **Applied Soil Ecology**, v. 166, 1 out. 2021.

HU, Q. et al. Biochar industry to circular economy. **Science of the Total Environment**, v. 757, 2021.

HU, Y.; CHEN, H. Biochar Amendment in the Green Roof Substrate Improve Air Quality. **E3S Web of Conferences**, v. 350, p. 01005, 9 maio 2022.

HUANG, H. J. et al. Thermochemical liquefaction characteristics of sewage sludge in different organic solvents. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 109, p. 176–184, 1 set. 2014.

HUANG, Z. et al. Industrial and agricultural waste amendments interact with microorganism activities to enhance P availability in rice-paddy soils. **Elsevier**, v. 95, 2023.

IBGE. **Produção Agropecuária 2022**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/br>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

IBI. **State of the Biochar Industry 2014**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/11/ibi_state_of_the_industry_2014_final.pdf>. Acesso em: 4 out. 2023.

IPPOLITO, J. A. et al. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. **Biochar**, v. 2, p. 421–438, 2020.

JATAV, H. S. et al. Sustainable Approach and Safe Use of Biochar and Its Possible Consequences. **Sustainability** 2021, Vol. 13, Page 10362, v. 13, n. 18, p. 10362, 16 set. 2021.

JING, X. R. et al. Enhanced adsorption performance of tetracycline in aqueous solutions by methanol-modified biochar. **Chemical Engineering Journal**, v. 248, 2014.

KABEYI, M. J. B.; OLANREWAJU, O. A. Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 24 mar. 2022.

KAI, X. et al. Effect of torrefaction on rice straw physicochemical characteristics and particulate matter emission behavior during combustion. **Bioresource Technology**, v. 278, p. 1–8, 1 abr. 2019.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties, and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 359–378, 1 maio 2015a.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties, and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 359–378, 1 maio 2015b.

KAMBO, H. S.; MINARET, J.; DUTTA, A. Process Water from the Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Waste or a Valuable Product? **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 7, p. 1181–1189, 1 jul. 2018.

KAMEYAMA, K. et al. Influence of Sugarcane Bagasse-derived Biochar Application on Nitrate Leaching in Calcaric Dark Red Soil. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 1131–1137, jul. 2012.

KAMMANN, C. et al. Biochar as a Tool to Reduce the Agricultural Greenhouse-Gas Burden – Knowns, Unknowns and Future Research Needs. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 25, n. 2, p. 114–139, 3 abr. 2017.

KANG, C. et al. Adsorption of Basic Dyes Using Walnut Shell-based Biochar Produced by Hydrothermal Carbonization. **Chemical Research in Chinese Universities**, v. 34, n. 4, p. 622–627, 1 ago. 2018.

KANT BHATIA, S. et al. Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. **Bioresource technology**, v. 340, 1 nov. 2021.

KHAN, M. et al. Artificial neural networks for the prediction of biochar yield: A comparative study of metaheuristic algorithms. **Bioresource Technology**, v. 355, p. 127215, 2022.

KHAN, N. et al. Biochar and environmental sustainability: Emerging trends and techno-economic perspectives. **Bioresource technology**, v. 332, 1 jul. 2021.

KOŃCZAK, M. et al. Sewage sludge and solid residues from biogas production derived biochar as an effective bio-waste adsorbent of fulvic acids from water or wastewater. **Chemosphere**, v. 278, 1 set. 2021.

KUMAR, A.; BHATTACHARYA, T. Biochar: a sustainable solution. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 5, p. 6642–6680, 1 maio 2021.

KUMAR, A.; SAINI, K.; BHASKAR, T. Hydrochar and biochar: Production, physicochemical properties, and techno-economic analysis. **Bioresource Technology**, v. 310, p. 123442, 1 ago. 2020.

KUNG, C. C.; MU, J. E. Prospect of China's renewable energy development from pyrolysis and biochar applications under climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109343, 1 out. 2019.

KWON, G. et al. One step fabrication of carbon supported cobalt pentlandite (Co₉S₈) via the thermolysis of lignin and Co₃O₄. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 27, p. 196–203, 1 out. 2018.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 363, n. 1492, p. 815–830, 27 fev. 2008.

LEE, J. et al. Hydrothermal carbonization of lipid extracted algae for hydrochar production and feasibility of using hydrochar as a solid fuel. **Energy**, v. 153, p. 913–920, 15 jun. 2018.

LEFEBVRE, D. et al. Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane residues in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2020.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, 2007

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006.

LI, G. et al. Comparative study of element mercury removal by three bio-chars from various solid wastes. **Fuel**, v. 145, 2015.

LI, Q. et al. Removal of organic compounds by nanoscale zero-valent iron and its composites. **Science of The Total Environment**, v. 792, p. 148546, 20 out. 2021.

LIBRA, J. A. et al. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes, and applications of wet and dry pyrolysis. <http://dx.doi.org/10.4155/bfs.10.81>, v. 2, n. 1, p. 71–106, jan. 2014.

LIN, B.; LI, Z. Is more use of electricity leading to less carbon emission growth? An analysis with a panel threshold model. **Energy Policy**, v. 137, 1 fev. 2020.

LIU, D. et al. Effects of corn straw biochar application on soybean growth and alkaline soil properties. **Bioresources**, v. 15, n. 1, p. 1463–1481, 1 fev. 2020.

LIU, J. Y. et al. Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System. **Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue**, v. 40, n. 5, p. 2394–2403, 1 maio 2019.

LIU, M. et al. Biochar combined with organic and inorganic fertilizers promoted the rapeseed nutrient uptake and improved the purple soil quality. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, 14 set. 2022.

LIU, P. et al. Modification of bio-char derived from fast pyrolysis of biomass and its application in removal of tetracycline from aqueous solution. **Bioresource Technology**, v. 121, 2012.

LIU, S. et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 2, p. 392–406, 1 mar. 2016.

LIU, X. et al. Characterization of human manure-derived biochar and energy-balance analysis of slow pyrolysis process. **Waste Management**, v. 34, n. 9, p. 1619–1626, 1 set. 2014.

LIU, Y. et al. Alkali-treated incineration bottom ash as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 371–378, 10 ago. 2018.

LIU, Z. et al. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. 2017.

LiveRoof Green Roof Systems - **Natural Function, Natural Beauty**. Disponível em: <<https://liveroof.com/>>. Acesso em: 3 nov. 2023.

LYU, H. et al. Ball-Milled Carbon Nanomaterials for Energy and Environmental Applications. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 5, n. 11, p. 9568–9585, 6 nov. 2017.

LYU, H. et al. Effects of ball milling on the physicochemical and sorptive properties of biochar: Experimental observations and governing mechanisms. **Environmental Pollution**, v. 233, p. 54–63, 1 fev. 2018.

LYU, H. et al. Biochar affects greenhouse gas emissions in various environments: A critical review. **Land Degradation & Development**, v. 33, n. 17, p. 3327–3342, 1 nov. 2022.

MA, Y. et al. Polyethylenimine modified biochar adsorbent for hexavalent chromium removal from the aqueous solution. **Bioresource Technology**, v. 169, 2014.

MACHADO, R. M. A. et al. Effects of Coir-Based Growing Medium with Municipal Solid Waste Compost or Biochar on Plant Growth, Mineral Nutrition, and Accumulation of Phytochemicals in Spinach. **Plants**, v. 11, n. 14, 1 jul. 2022.

MALAVIYA, P.; SINGH, A. Constructed Wetlands for Management of Urban Stormwater Runoff. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 20, p. 2153–2214, 15 out. 2012.

MAMADALIEVA N.A. Resource saving - the basis of economic growth. **International Journal on Integrated Education**, v. 3, n. 9, 2020.

MAO, J.; ZHANG, K.; CHEN, B. Linking hydrophobicity of biochar to the water repellency and water holding capacity of biochar-amended soil. **Environmental Pollution**, v. 253, p. 779–789, 1 out. 2019.

MARZEDDU, S. et al. A Life Cycle Assessment of an Energy-Biochar Chain Involving a Gasification Plant in Italy. **Land**, v. 10, n. 11, 1 nov. 2021.

MATUŠTÍK, J.; POHOŘELÝ, M.; KOČÍ, V. Is application of biochar to soil really carbon negative? The effect of methodological decisions in Life Cycle Assessment. **Science of the Total Environment**, v. 807, 2022.

MCDONNELL, B. E. et al. PySWMM: The Python Interface to Stormwater Management Model (SWMM). **Journal of Open Source Software**, v. 5, n. 52, p. 2292, 4 ago. 2020.

MEHMOOD, K. et al. Biochar research activities and their relation to development and environmental quality. A meta-analysis. **Agron. Sustain. Dev**, v. 37, p. 22, 2017.

MENDOZA MARTINEZ, C. L. et al. Evaluation of thermochemical routes for the valorization of solid coffee residues to produce biofuels: A Brazilian case. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 110585, 1 mar. 2021.

MERZARI, F. et al. Hydrothermal carbonization of biomass: Design of a bench-Scale reactor for evaluating the heat of reaction. **Chemical Engineering Transactions**, v. 65, p. 43–48, 2018.

MERZARI, F. et al. Methane production from process water of sewage sludge hydrothermal carbonization. A review. Valorising sludge through hydrothermal carbonization. **Taylor & FrancisF Merzari, M Langone, G Andreottola, L Fiori Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019•Taylor & Francis**, v. 49, n. 11, p. 947–988, 3 jun. 2019.

MEVA ENERGY. Disponível em <https://mevaenergy.com/home/our-technology/sofidel-kisa-plant/>. Acesso em: (23/10/2023).

MILIOTTI, E. et al. Lab-scale pyrolysis and hydrothermal carbonization of biomass digestate: Characterization of solid products and compliance with biochar standards. **Biomass and Bioenergy**, v. 139, p. 105593, 1 ago. 2020.

MISRA, V.; PANDEY, S. D. Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India. **Environment International**, 2005.

MOHAN, D. et al. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. **Bioresource Technology**, v. 160, p. 191–202, 1 maio 2014.

MONDAL, S.; AIKAT, K.; HALDER, G. Ranitidine hydrochloride sorption onto superheated steam activated biochar derived from mung bean husk in fixed bed column. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 1, p. 488–497, 1 mar. 2016.

MULATINHO, L. M. S. S. et al. Produção e caracterização de bio-óleo obtido a partir de resíduos sólidos urbanos via pirólise e cromatografia. **Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, 2022.

NAKASON, K. et al. Torrefaction of Agricultural Wastes: Influence of Lignocellulosic Types and Treatment Temperature on Fuel Properties of Biochar. **International Energy Journal**, 2019.

NATH, H.; SARKAR, B. Biochar from Biomass: A Review on Biochar Preparation Its Modification and Impact on Soil Including Soil Microbiology. **Geomicrobiology Journal**, v. 39, p. 373–388, 2022.

NETZERO. **Sites de Produção**. Disponível em: <<https://netzero.green/pt/production-sites/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

NGABUK, D. A.; IMMANUEL, J.; IRAWATI, D. Y. Life Cycle Assessment Kerangka Hand Sanitizer Pedal. **Industrial & System Engineering Journals (ISEJOU)**, v. 1, n. 1, 2022.

NICHOLAS SOKIC. Airex Energy completes \$38M funding for biochar project. **Sustainable BIZ Canada**, 29 mar. 2023.

OERTEL, C. et al. Greenhouse gas emissions from soils—A review. **Geochemistry**, v. 76, n. 3, p. 327–352, 1 out. 2016.

OGINNI, O. et al. Phosphorus adsorption behaviors of MgO modified biochars derived from waste woody biomass resources. **Elsevier**, 2020.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Evaluation of Brazilian potential for generating electricity through animal manure and sewage. **Biomass and Bioenergy**, v. 139, p. 105654, 1 ago. 2020.

OLIVEIRA, F. R. et al. **Environmental application of biochar: Current status and perspectives**. **Bioresource Technology**, 2017.

OLIVEIRA, I.; BLÖHSE, D.; RAMKE, H. G. Hydrothermal carbonization of agricultural residues. **Bioresource Technology**, v. 142, p. 138–146, 1 ago. 2013.

OSMAN, A. I. et al. Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review. **Environmental Chemistry Letters** 2022 20:4, v. 20, n. 4, p. 2385–2485, 7 maio 2022.

PALANSOORIYA, K. N. et al. Impacts of biochar application on upland agriculture: A review. **Journal of environmental management**, v. 234, p. 52–64, 15 mar. 2019.

PANAHI, H. et al. A comprehensive review of engineered biochar: Production, characteristics, and environmental applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 122462, 10 out. 2020.

PANDEY, G.; KUMARI, S. Understanding agricultural growth and performance in Bihar, India. **Springer Nature Business & Economics**, 2021.

PARK, J. H. et al. Cadmium adsorption characteristics of biochars derived using various pine tree residues and pyrolysis temperatures. **Journal of colloid and interface science**, v. 553, p. 298–307, 1 out. 2019a.

PARK, J. H. et al. Cadmium adsorption characteristics of biochars derived using various pine tree residues and pyrolysis temperatures. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 553, p. 298–307, 1 out. 2019b.

PARK, Y.-K. et al. Physicochemical Properties and Cu Sorption of the Biochar Derived from Woody Biomass. **Journal of Soil and Groundwater Environment**, v. 17, n. 2, p. 54–61, 30 abr. 2012.

PATEL, S. et al. A critical literature review on biosolids to biochar: an alternative biosolids management option. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 19, n. 4, p. 807–841, 1 dez. 2020.

PENG, C. et al. Production of char from sewage sludge employing hydrothermal carbonization: Char properties, combustion behavior and thermal characteristics. **Fuel**, v. 176, p. 110–118, 15 jul. 2016.

PERERA, F. Pollution from Fossil-Fuel Combustion is the Leading Environmental Threat to Global Pediatric Health and Equity: Solutions Exist. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 2018, Vol. 15, Page 16, v. 15, n. 1, p. 16, 23 dez. 2017.

POKHAREL, A.; ACHARYA, B.; FAROOQUE, A. Biochar-Assisted Wastewater Treatment and Waste Valorization. **Applications of Biochar for Environmental Safety**, 22 jul. 2020.

QIAN, K. et al. Recent advances in utilization of biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1055–1064, 1 fev. 2015.

QIU, B. et al. Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 2021.

QIU, M. et al. **Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. Biochar**, 2022.

RACLAVSKÁ, H. et al. Effect of temperature on the enrichment and volatility of 18 elements during pyrolysis of biomass, coal, and tires. **Fuel Processing Technology**, v. 131, p. 330–337, 1 mar. 2015.

RAHMAN, A.; AUNG, K. M. Modeling, and simulation of graphene/palladium catalyst reformer for hydrogen generation from waste of IC engine. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 290, n. 1, 30 jan. 2018.

RAI, P. K. et al. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. **Environment International**, v. 125, p. 365–385, 1 abr. 2019.

RAJAPAKSHA, A. U. et al. Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: Potential and implication of biochar modification. **Chemosphere**, 2016.

RAJESH BANU, J. et al. Integrated biorefinery routes of biohydrogen: Possible utilization of acidogenic fermentative effluent. **Bioresource Technology**, v. 319, p. 124241, 1 jan. 2021.

RAMOS, H. M. et al. Smart Water Management towards Future Water Sustainable Networks. **Water 2020, Vol. 12, Page 58**, v. 12, n. 1, p. 58, 21 dez. 2019.

RASA, K. et al. How and why does willow biochar increase a clay soil water retention capacity? **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 346–353, 1 dez. 2018.

RAUPACH, M. R. et al. Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 104, n. 24, 2007.

RISLEY, J. C.; ZAMMIT, C. Simulating the Hydrologic Response to Climate Change in Three New Zealand Headwater Basins Using CMIP6 Datasets. **Earth Interactions**, v. 27, n. 1, 16 mar. 2023.

RISSMAN, J. et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. **Applied Energy**, v. 266, p. 114848, 15 maio 2020.

RONSSSE, F. et al. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 104–115, 1 mar. 2013.

RONSSSE, F. Biochar Production. **Biochar**, p. 199–226, 1 dez. 2016.

RUMPEL, C. et al. The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations, and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. **Ambio**, v. 49, n. 1, p. 350–360, 1 jan. 2020.

RUSSELL, S. H. et al. Increased charcoal yield and production of lighter oils from the slow pyrolysis of biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 124, p. 536–541, 1 mar. 2017.

SABIO, E. et al. Conversion of tomato-peel waste into solid fuel by hydrothermal carbonization: Influence of the processing variables. **Waste Management**, v. 47, p. 122–132, 1 jan. 2016.

SADAKA, S. et al. Characterization of Biochar from Switchgrass Carbonization. **Energies 2014, Vol. 7, Pages 548-567**, v. 7, n. 2, p. 548–567, 24 jan. 2014.

SAFARIAN, S. Performance analysis of sustainable technologies for biochar production: A comprehensive review. **Energy Reports**, v. 9, p. 4574–4593, 1 dez. 2023.

SALETNIK, B. et al. Biochar as a multifunctional component of the environment-a review. **Applied Sciences (Switzerland)**, 2019.

SANCHEZ-MONEDERO, M. A. et al. Role of biochar as an additive in organic waste composting. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1155–1164, 1 jan. 2018.

SANTOS, T. G. et al. Assessment of agricultural efficiency and yield gap for soybean in the Brazilian Central Cerrado biome. **Bragantia**, v. 80, 2021.

SARAVANAN, A. et al. Biohydrogen from organic wastes as a clean and environment-friendly energy source: Production pathways, feedstock types, and prospects. **Bioresource Technology**, 2021.

SCHLESINGER, W. H.; AMUNDSON, R. Managing for soil carbon sequestration: Let's get realistic. **Global Change Biology**, v. 25, n. 2, p. 386–389, 1 fev. 2019.

SCOWN, C. D. et al. Technoeconomic analysis for biofuels and bioproducts. **Current Opinion in Biotechnology**, 2021.

SELVARAJOO, A. et al. Biochar production via pyrolysis of citrus peel fruit waste as a potential usage as solid biofuel. **Chemosphere**, v. 294, p. 133671, 1 maio 2022.

SETTER, C. et al. Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. **Fuel**, v. 261, p. 116420, 1 fev. 2020.

SHADDICK, G. et al. Half the world's population are exposed to increasing air pollution. **npj Climate and Atmospheric Science**, v. 3, n. 1, 1 dez. 2020.

SHAN, D. et al. Preparation of ultrafine magnetic biochar and activated carbon for pharmaceutical adsorption and subsequent degradation by ball milling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 305, p. 156–163, 15 mar. 2016.

SHEN, B. et al. Elemental mercury removal by the modified bio-char from medicinal residues. **Chemical Engineering Journal**, v. 272, p. 28–37, 15 jul. 2015.

SHIM, T. et al. Effect of steam activation of biochar produced from a giant Miscanthus on copper sorption and toxicity. **Bioresource Technology**, v. 197, p. 85–90, 1 dez. 2015.

SHYAM, S. et al. Biomass as source for hydrochar and biochar production to recover phosphates from wastewater: A review on challenges, commercialization, and future perspectives. **Chemosphere**, v. 286, p. 131490, 1 jan. 2022.

SIMPSON, D. R. Biofilm processes in biologically active carbon water purification. **Water Research**, 2008.

SINGH, S. et al. A sustainable paradigm of sewage sludge biochar: Valorization, opportunities, challenges, and future prospects. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122259, 1 out. 2020.

SNIS. Diagnóstico Água, Esgoto e Resíduos Sólidos. Ano de referência 2021. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/diagnosticos_snis>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SOMBROEK, W. G. et al. Terra Preta and Terra Mulata: pre-Columbian Amazon kitchen middens and agricultural fields, their sustainability, and their replication. **Contribution to Symposium 18-Anthropogenic factors of soil formation-of the 17th World Congress of Soil Science**. 2002.

SØRMO, E. et al. Stabilization of PFAS-contaminated soil with activated biochar. **The Science of the total environment**, v. 763, 1 abr. 2021.

SPINOSA, L.; CARELL, C. Planning the Management of Municipal Solid Waste: The Case of Region “Puglia (Apulia)” in Italy. Em: **Integrated Waste Management - Volume I**. 2011.

SRINIVASAN, P. et al. A feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: Production, characterization, and potential applications. **Science of The Total Environment**, v. 512–513, p. 495–505, 15 abr. 2015.

SULAYMON, A. H.; ALMILLY, R. F. Hydrodynamics and mass transfer using three-phase fluidized bed contactor. **International Review of Mechanical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 86–96, 2012.

SUMALINOG, D. A. G.; CAPAREDA, S. C.; DE LUNA, M. D. G. Evaluation of the effectiveness and mechanisms of acetaminophen and methylene blue dye adsorption on activated biochar derived from municipal solid wastes. **Journal of environmental management**, v. 210, p. 255–262, 15 mar. 2018.

SUN, L.; WAN, S.; LUO, W. Biochars prepared from anaerobic digestion residue, palm bark, and eucalyptus for adsorption of cationic methylene blue dye: Characterization, equilibrium, and kinetic studies. **Bioresource Technology**, v. 140, 2013.

SUSILAWATI, A.; MAFTUAH, E.; FAHMI, A. The utilization of agricultural waste as biochar for optimizing swampland: a review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 980, n. 1, p. 012065, 1 dez. 2020.

TAN, M. Conversion of agricultural biomass into valuable biochar and their competence on soil fertility enrichment. **Environmental Research**, v. 234, 1 out. 2023.

TAN, X. et al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, 2015.

TAN, X. FEI et al. Biochar-based nano-composites for the decontamination of wastewater: A review. **Bioresource Technology**, 2016.

TIAN, H. et al. Kinetic study on the CO₂ gasification of biochar derived from Miscanthus at different processing conditions. **Energy**, v. 217, p. 119341, 15 fev. 2021.

TOPIK, S. How Brazil Expanded the World Coffee Economy. 2019.

TSAI, C.-C. et al. Impact of wood biochar addition on nutrient leaching and fertility in a rural ultisols of Taiwan. **Taiwanese Journal of Agricultural Chemistry and Food Science**, v. 51, p. 80–93, 2013.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015.

U.S. BIOCHAR INITIATIVE. **Survey and Analysis of the US Biochar Industry Executive Summary Survey and Analysis of the US Biochar Industry**. 2018. Disponível em: <https://biochar-us.org/sites/default/files/news-files/Preliminary%20Biochar%20Industry%20Report%2008162018_0.pdf>. Acesso em: 4 out. 2023.

USMAN, A. R. A. et al. Chemically modified biochar produced from conocarpus waste increases NO₃ removal from aqueous solutions. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 38, n. 2, 2016.

VAN ZWIETEN, L. et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, n. 1, p. 235–246, jan. 2010.

VASILAKOS, P. N. et al. US Clean Energy Futures—Air Quality Benefits of Zero Carbon Energy Policies. **Atmosphere**, v. 13, n. 9, 1 set. 2022.

VELMURUGAN, V. Review of research and development on pyrolysis process. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, p. 3679–3686, 1 jan. 2022.

VERMA, A. K.; DASH, R. R.; BHUNIA, P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. **Journal of Environmental Management**, v. 93, n. 1, p. 154–168, 1 jan. 2012.

VIEIRA, F. R. et al. Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk. **Biomass and Bioenergy**, v. 132, p. 105412, 1 jan. 2020.

VYAVAHARE, G. et al. Sorption of brilliant green dye using soybean straw-derived biochar: characterization, kinetics, thermodynamics, and toxicity studies. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 43, n. 8, p. 1–14, 1 ago. 2021.

WAN, Y. et al. Microwave-assisted pyrolysis of biomass: Catalysts to improve product selectivity. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 86, n. 1, p. 161–167, 1 set. 2009.

WANG, B. et al. Recent advances in engineered biochar productions and applications. **Taylor & Francis** Wang, B Gao, J Fang **Critical reviews in environmental science and technology**, 2017 • Taylor & Francis, v. 47, n. 22, p. 2158–2207, 17 nov. 2018.

WANG, B.; FANG, J. Recent advances in engineered biochar productions and applications Colloid transport in DOM rich environments. 2018.

WANG, D. et al. Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. **Science of the Total Environment**, v. 723, 2020.

WANG, J.; WANG, S. **Preparation, modification, and environmental application of biochar: A review. Journal of Cleaner Production**, 2019.

WANG, Y.; YIN, R.; LIU, R. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 110, n. 1, p. 375–381, 1 nov. 2014.

WANG, Z. et al. Co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks. **Waste management**, v. 89, p. 430–438, 15 abr. 2019.

WAQAS, M. et al. Development of biochar as fuel and catalyst in energy recovery technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 477–488, 1 jul. 2018.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240–261, 1 abr. 2018.

WEI, L. et al. Development, current state, and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis. **Environment International**, v. 144, p. 106093, 1 nov. 2020.

WEI, Y. et al. Stabilization of Soil Co-Contaminated with Mercury and Arsenic by Different Types of Biochar. **Sustainability**, v. 14, n. 20, 1 out. 2022.

WILTON, N. et al. Remediation of heavy hydrocarbon impacted soil using biopolymer and polystyrene foam beads. **Journal of Hazardous Materials**, v. 349, 2018.

WINK, J.; MOHAMMADIPANAH, F.; SHARIAT PANAH, H. K. Practical aspects of working with actinobacteria. Em: **Biology and Biotechnology of Actinobacteria**. 2017.

WONG, J. W. C.; OGBONNAYA, U. O. Biochar porosity: a nature-based dependent parameter to deliver microorganisms to soils for land restoration. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 34, p. 46894–46909, 1 set. 2021.

WOOLF, D. et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 1, n. 5, 2010a.

WOOLF, D. et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 1, n. 5, 2010b.

WOOLF, D. et al. Greenhouse Gas Inventory Model for Biochar Additions to Soil. **Environmental Science and Technology**, v. 55, n. 21, p. 14795–14805, 2 nov. 2021.

WU, P. et al. Bibliometric analysis of biochar research in 2021: a critical review for development, hotspots and trend directions. **Springer**, v. 5, n. 6, 2023.

WU, S. C. et al. Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: A greenhouse trial. **Geoderma**, v. 125, n. 1–2, p. 155–166, mar. 2005.

WYN, H. K. et al. A Novel Approach to the Production of Biochar with Improved Fuel Characteristics from Biomass Waste. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 12, 2020.

XIA, L. et al. Climate mitigation potential of sustainable biochar production in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 175, p. 113145, 1 abr. 2023.

XIE, T. et al. Characteristics and Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 9, p. 939–969, 3 maio 2015.

XU, Z. et al. Impacts of different activation processes on the carbon stability of biochar for oxidation resistance. **Bioresource Technology**, v. 338, p. 125555, 1 out. 2021.

YADAV, G. et al. Lipid content, biomass density, fatty acid as selection markers for evaluating the suitability of four fast growing cyanobacterial strains for biodiesel production. **Bioresource Technology**, v. 325, p. 124654, 1 abr. 2021.

YAN, M. et al. Biochar and pyrolytic gas properties from pyrolysis of simulated municipal solid waste (SMSW) under pyrolytic gas atmosphere. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, v. 2, n. 1, p. 37–46, 1 mar. 2020.

YAN, W. et al. Mass and energy balances of wet torrefaction of lignocellulosic biomass. **Energy and Fuels**, v. 24, n. 9, p. 4738–4742, 16 set. 2010.

YANG, L. et al. Biochar Improves Sugarcane Seedling Root and Soil Properties Under a Pot Experiment. **Sugar Tech**, v. 17, n. 1, p. 36–40, 1 mar. 2015.

YANG, Q. et al. Prospective contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals. **Nature**, 2021a.

YANG, Q. et al. Country-level potential of carbon sequestration and environmental benefits by utilizing crop residues for biochar implementation. **Applied Energy**, v. 282, p. 116275, 15 jan. 2021b.

YAO, Y. et al. Engineered biochar from biofuel residue: Characterization and its silver removal potential. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 7, n. 19, 2015.

YAO, Y. et al. Removal of sulfamethoxazole (SMX) and sulfapyridine (SPY) from aqueous solutions by biochars derived from anaerobically digested bagasse. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 26, p. 25659–25667, 1 set. 2018.

YARGICOGLU, E. N. et al. Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars. 2014.

YOON, K. et al. Fabrication of engineered biochar from paper mill sludge and its application into removal of arsenic and cadmium in acidic water. **Bioresource Technology**, v. 246, p. 69–75, 1 dez. 2017.

YOON, K. et al. Engineered biochar composite fabricated from red mud and lipid waste and synthesis of biodiesel using the composite. **Journal of Hazardous Materials**, v. 366, p. 293–300, 15 mar. 2019.

YOUSAF, B. et al. Systematic investigation on combustion characteristics and emission-reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass- and biochar-coal co-combustion systems. **Applied Energy**, v. 208, p. 142–157, 15 dez. 2017.

YU, K. L. et al. Recent developments on algal biochar production and characterization. **Bioresource Technology**, v. 246, p. 2–11, 1 dez. 2017.

YUAN, M. L. et al. Mitochondrial phylogeny, divergence history and high-altitude adaptation of grassland caterpillars (Lepidoptera: Lymantriinae: Gynaephora) inhabiting the Tibetan Plateau. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 122, p. 116–124, 1 maio 2018.

YUSOP, Y. M.; OTHMAN, N. Linking the Malaysia's Solid Waste Management Policy Instruments with Household Recycling Behavior. **International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development**, v. 8, n. 4, 2019.

ZHANG, C. et al. Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. **Applied Energy**, v. 220, p. 598–604, 15 jun. 2018.

ZHANG, C. et al. Rebuilding the linkage between livestock and cropland to mitigate agricultural pollution in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 144, p. 65–73, 1 maio 2019a.

ZHANG, H. et al. Production of biochar from waste sludge/leaf for fast and efficient removal of diclofenac. **Journal of Molecular Liquids**, v. 299, 1 fev. 2020.

ZHANG, S.; XIONG, Y. Washing pretreatment with light bio-oil and its effect on pyrolysis products of bio-oil and biochar. **RSC Advances**, v. 6, n. 7, p. 5270–5277, 12 jan. 2016.

ZHANG, X. et al. Effect of pyrolysis temperature on composition, carbon fraction and abiotic stability of straw biochars: correlation and quantitative analysis. **Carbon Research**, v. 1, n. 1, 1 dez. 2022.

ZHANG, Z. et al. Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. **Elsevier**, v. 171, p. 581–598, 2019b.

ZHENG, J.; STEWART, C. E.; COTRUFO, M. F. Biochar and Nitrogen Fertilizer Alters Soil Nitrogen Dynamics and Greenhouse Gas Fluxes from Two Temperate Soils. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 5, p. 1361–1370, set. 2012.

ZHOU, H. et al. Environmental impacts and optimizing strategies of municipal sludge treatment and disposal routes in China based on life cycle analysis. **Environment International**, v. 166, p. 107378, 2022.

ZHOU, X. et al. Effects of pyrolysis parameters on physicochemical properties of biochar and bio-oil and application in asphalt. **Science of The Total Environment**, v. 780, p. 146448, 1 ago. 2021.

APÊNDICE A — Tabela inicial contendo as principais empresas produtoras de biochar mais relevantes no cenário mundial adquiridas através de busca realizada em resumos de relatórios financeiros referentes ao mercado global, contendo o motivo da exclusão da empresa.

Nome	Site	País	Inclusão
Airex Energy	airex-energy.com	Canadá	Sim
Antaco	antaco.co.uk	Reino Unido	Sim
Aries Clean Energy	ariescleantech.com	EUA	Sim
Arigna Fuels	arignafuels.ie	Irlanda	Sim
Biochar Now	biocharnow.com	EUA	Não, informações indisponíveis
Carbo Culture	carboculture.com	Finlândia	Sim
Carbofex	carbofex.fi	Finlândia	Sim
Carbon Gold	carbongold.com	Reino Unido	Não, informações indisponíveis
Carbonis	carbonis.de	Alemanha	Sim
Carbuna Biochar	compensate.com/projects/carbuna-biochar	Alemanha	Não, informações indisponíveis
C-Green	c-green.se	Suíça	Não, produz equipamento para terceiros
Charline Gmbh	char-line.com	Áustria	Não, informações indisponíveis
CharTech Solutions	chartechnologies.com	Canadá	Sim

CPL Industries	cplindustries.co.uk	Reino Unido	Sim
Circular Carbon	circular-carbon.com	Alemanha	Sim
Coaltec Energy	coalteceenergy.com	EUA	Sim
Earth Care Products	ecpisystems.com	EUA	Não, informações indisponíveis
ECOERA	ecoera.se	Suécia	Sim
Farm2Energy	farm2energy.com	Índia	Não, informações indisponíveis
Frontline Bioenergy	frontlinebioenergy.com	EUA	Não, informações indisponíveis
Green Man Char	greenmanchar.com.au	Australia	Não, informações indisponíveis
HTCycle	htcycle.ag	Alemanha	Não, informações indisponíveis
Husk Ventures	huskventures.com	Camboja	Sim
Ibero Massa Florestal	imflorestal.com	Portugal	Não, informações indisponíveis
Ingelia	ingelia.com	Espanha	Sim
Karr Group	biochar-us.org/sites/default/files/presentations/2.4.2%20Talwar%20C%20Mahesh.pdf	EUA	Não, empresa inativa

Meva Energy	mevaenergy.com	Suécia	Sim
Netzero	netzero.green	Brasil/Camarões	Sim
Novocarbo	novocarbo.com	Alemanha	Sim
Oregon Biochar Solutions	chardirect.com	EUA	Não, informações indisponíveis
Pacific Biochar	pacificbiochar.com	EUA	Não, informações indisponíveis
Phoenix Energy	phoenixenergy.net	EUA	Não, informações indisponíveis
Pyreg GmbH	pyreg.com	Alemanha	Não, produz equipamento para terceiros
Renewable Carbon Resources Australia	rcra.com.au	Australia	Não, informações indisponíveis
SoMax	somaxhtc.com	EUA	Sim
Syncraft	syncraft.at	Áustria	Não, produz equipamento para terceiros
TerraNova Energy	terranova-energy.com	Polonia	Sim
Torrec	torrec.fi	Finlândia	Não, informações indisponíveis
VOW Green Metals	vowgreenmetals.com	Noruega	Não, informações indisponíveis

Wakefield Biochar	wakefieldbiochar.com	EUA	Não, informações indisponíveis
------------------------------	----------------------	-----	--------------------------------------
