



DELBA HELENE CUNHA SILVA

**USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA PRODUÇÃO DE
BIOCHAR PARA CAPTURA DE CO₂**

**LAVRAS – MG
2026**

DELBA HELENE CUNHA SILVA

**USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR PARA
CAPTURA DE CO₂**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Mudanças Climáticas, Energia e Poluição Atmosférica, para a obtenção do título de Mestre.

Prof^a. Dr^a. Jessica de Oliveira Notorio Ribeiro
Orientadora

Prof. Dr. Guilherme Max Dias Ferreira
Coorientador

**LAVRAS – MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Delba Helene Cunha Silva.

Uso de resíduos agrícolas para produção de biochar para
captura de CO₂ / Delba Helene Cunha Silva Silva. - 2025.
74 p. : il.

Orientadora: Jessica de Oliveira Notório Ribeiro
Coorientador: Guilherme Max Dias Ferreira

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Descarbonização. 2. Captura de CO₂. 3. Adsorção. 4. Energia. I. Ribeiro, Jessica
de Oliveira Notório. II. Ferreira, Guilherme Max Dias. III. Universidade Federal de
Lavras. IV. Título.

DELBA HELENE CUNHA SILVA

**USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR PARA
CAPTURA DE CO₂**

**USE OF AGRICULTURAL WASTE FOR PRODUCTION OF BIOCHAR FOR CO₂
CAPTURE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Mudanças Climáticas, Energia e Poluição Atmosférica, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 24 de Outubro de 2025

Prof^a. Dr^a. Jessica de Oliveira Notorio Ribeiro UFLA

Prof. Dr. Guilherme Max Dias Ferreira UFLA

Prof. Dr. Leonardo Sant Ana Gallo UFLA

Prof^a. Dr^a. Mariana Arruda Pereira UFSJ



Prof^a. Dr^a. Jessica de Oliveira Notorio Ribeiro
Orientadora

Prof. Dr. Guilherme Max Dias Ferreira
Coorientador

**LAVRAS – MG
2026**

A Deus toda honra e toda glória por ter me guiado até aqui!

Dedico este trabalho aos meus pais Deosolito e Alba,
minha irmã Isabella, minha madrinha Luiza e em
especial a minha Tia “Tuca” (*in memoriam*) que
sempre estará presente em meu coração.

AGRADECIMENTOS

A toda Universidade Federal de Lavras desde a equipe de limpeza à reitoria.

Agradeço imensamente aos meus professores, especialmente, a minha orientadora pela paciência e ao meu coorientador por todo o conhecimento compartilhado, apoio e motivação.

Agradeço a Doutora Cristina por me fazer acreditar que eu era capaz e me inscrever para o processo seletivo ao mestrado, acho que consegui! Agradeço aos amigos e amigas de Piumhi, em especial Fernanda, Rafaela, Thuany, Michelle, Cássia, Carlos e aos de Vargem Bonita que mesmo na correria do dia-a-dia nunca deixaram de se fazer presença, de compartilhar momentos e de me motivar nessa caminhada. Minha amiga Gabriela que da Irlanda sempre me motivou, Paulinho (Hungria), Rafaela (Portugal) e demais amigos, mesmo de longe, pelo incentivo. Aos meus amigos de jornada Thainara, Isabelly, Álvaro Ferney e Virgílio e amigos que me acolheram em Lavras muito obrigada por tudo!

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e Fundação de Apoio a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), a FINEP pelo apoio financeiro e de essencial fomento ao desenvolvimento científico. Muito Obrigada!

RESUMO

O aumento na demanda energética e utilização de combustíveis fósseis tem agravado as mudanças climáticas desencadeadas pelo excesso de dióxido de carbono na atmosfera. Problemas decorrentes dessas alterações têm levado países a desenvolver novas formas de tecnologia para descarbonização e uma transição energética limpa. Entre elas, o biocarvão, obtido por meio de resíduos agrícolas por processo de pirólise, tem se destacado como potencial material de captura e armazenamento de carbono. Suas propriedades permitem sua aplicação no solo, tratamento de gases, entre outros. Desse modo o objetivo deste trabalho foi comparar o potencial de captura de CO_2 a partir da produção de biocarvão de seis tipos de biomassas derivadas de resíduos agrícolas (casca de arroz (CA), casca de café (CC), palha de trigo (PT), palha de soja (PS), palha de feijão (PF) e palha de milho (PM)). As biomassas foram previamente submetidas a ativação química com KOH (1:1) e então pirolisadas em forno mufla. As amostras foram caracterizadas química e estruturalmente por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier e Reflectância Total Atenuada (FTIR-ATR); análise Termogravimétrica e Análise Térmica Diferencial (TG/DTA) para determinação da estabilidade térmica e cinética de adsorção, a determinação de área superficial foi obtida por análise pelo método Brunauer – Emmett-Teller (BET) e avaliação microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raio X (MEV-EDS). Observou-se que os biocarvões apresentaram potencial de captura de CO_2 variando entre 0,12 e 0,39 mmol/g. O biocarvão PS e CA exibiram as menores áreas superficiais_{BET} (0,017 m²/g e 30,18 m²/g), porém se destacaram com as maiores massas de CO_2 adsorvidas, sendo de 0,39 e 0,23 mmol/g respectivamente. Propõe-se que a funcionalização química da superfície promovida pelo hidróxido de potássio se sobrepôs às limitações texturais desses materiais, com papel dos grupos superficiais de oxigênio e nitrogênio. Portanto, conclui-se que o processo de ativação química com KOH foi determinante para aprimorar o desempenho adsorativo dos biocarvões, ao promover modificações estruturais e químicas favoráveis à captura de CO_2 . Esses resultados reforçam o potencial do biocarvão ativado como material promissor, sustentável e economicamente viável para aplicação em tecnologias de remoção e sequestro de carbono, alinhando-se às metas globais de mitigação das emissões e descarbonização do setor energético.

Palavras-chave: descarbonização; captura de CO_2 ; adsorção; energia.

ABSTRACT

The increase in energy demand and the use of fossil fuels has increasingly exacerbated climate change triggered by excess carbon dioxide in the atmosphere. Problems arising from these changes have led countries to develop new technologies for decarbonization and a clean energy transition. Among them, biochar obtained from agricultural waste through the pyrolysis process has emerged as a potential product for carbon capture and storage. Its characteristics allow for applications ranging from soil application to gas treatment, among others. Thus, the objective of this study is to compare the CO₂ capture potential from biochar production using six types of biomass derived from agricultural waste, subjected to chemical activation with KOH (1:1) and then pyrolyzed in a muffle furnace. The biochars were named after thermal treatment according to their respective biomass initials: rice husk (CA), coffee husk (CC), wheat straw (PT), soybean straw (PS), bean straw (PF), and corn straw (PM). The samples were chemically and structurally characterized by FTIR-ATR; TG/DTA analysis to determine thermal stability and adsorption kinetics; surface area determination was obtained by BET analysis and microstructural evaluation by SEM-EDS. It was observed that all biochar showed CO₂ capture potential (0,12 e 0,39 mmol/g). PS (soybean straw) and CA (rice husk) exhibited the smallest BET surface areas (0.017 m²/g and 30.18 m²/g), but stood out with the largest adsorbed masses (0,39 e 0,23 mmol/g), respectively. It is proposed that chemical functionalization of the surface overcame the textural limitations of these materials, with the role of oxygen and nitrogen surface groups. Therefore, it is concluded that the chemical activation process with KOH was decisive in improving the adsorptive performance of biochars by promoting structural and chemical modifications favorable to CO₂ capture. These results reinforce the potential of activated biochar as a promising, sustainable, and economically viable material for application in carbon removal and sequestration technologies, aligning with global goals of mitigating emissions and decarbonizing the energy sector.

Keywords: decarbonization; CO₂ capture; adsorption; energy.

INDICADORES DE IMPACTOS

A pesquisa no âmbito ambiental com foco nas mudanças climáticas e, especificamente, a captura de carbono, como o estudo do biocarvão a partir de resíduos agrícolas, têm alta relevância socio-ambiental e está alinhada a agendas internacionais e objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) proposto pela ONU. No âmbito social, essas pesquisas promovem a conscientização da população sobre a urgência das mudanças climáticas, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis, educação ambiental e o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à mitigação e adaptação. Além disso, a melhoria na qualidade do solo e o aumento da produtividade agrícola, proporcionados pelo biocarvão, têm reflexos diretos na segurança alimentar e hídrica para sociedade desde pequenos a grandes centros. A criação de tecnologias de baixo custo para a produção de biocarvão, utilizando resíduos que antes seriam descartados, pode gerar oportunidades de emprego e renda dignos em comunidades rurais, impulsionando a economia circular e local. A produção de biocarvão em larga escala pode criar uma nova cadeia de valor, com a comercialização do material para uso agrícola como condicionador de solo, fertilizante e, principalmente, como sumidouro de carbono. Isso gera um potencial de créditos de carbono, valorizando a produção e incentivando a adoção da técnica por agricultores e empresas.

IMPACT INDICATORS

Environmental research focusing on climate change and, specifically, carbon capture, such as the study of biochar from agricultural waste, has high socio-environmental relevance and is aligned with international agendas and the UN's Sustainable Development Goals (SDGs). Socially, this research raises public awareness of the urgency of climate change, encouraging the adoption of more sustainable practices, environmental education, and the development of public policies aimed at mitigation and adaptation. Furthermore, the improved soil quality and increased agricultural productivity provided by biochar have direct impacts on food and water security for societies from small to large cities. The development of low-cost technologies for biochar production, using waste that would otherwise be discarded, can generate decent employment and income opportunities in rural communities, boosting the circular and local economy. Large-scale biochar production can create a new value chain, with the material being commercialized for agricultural use as a soil conditioner, fertilizer, and, most importantly, as a carbon sink. This generates potential for carbon credits, increasing the value of production and encouraging farmers and companies to adopt the technique.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma simplificado do ciclo biogeoquímico global do carbono (fluxos em Tg ano ⁻¹).....	17
Figura 2 - Emissões antrópicas líquidas globais de GEE de 1990 a 2019	18
Figura 3 – Principais culturas agrícolas x área colhida hectares (ha) 2023/2024	23
Figura 4 – Produtividade (t/ha) por Biomassa 2023/2024	24
Figura 5 – Quantificação de teor de extrativos	34
Figura 6 – a) Processo de fervura para obtenção de lignina insolúvel, b) bomba a vácuo utilizada na filtração	35
Figura 7 – Banho termostatzado e biomassa final obtida do filtrado para disposição em estufa.....	35
Figura 8 – Processo de obtenção do teor de cinzas – a) mufla b) estufa c)Dessecador	36
Figura 9 - Pré processamento – a) moinho b) biomassa c) estufa.....	37
Figuras 10 – Ativação química a) KOH em escamas; b) e c) biomassas no agitador magnético.....	38
Figura 11 – Biomassas ativadas secas – a) casca de arroz, b) casca de café, c) palha de trigo, d) palha de soja, e) palha de feijão e f) palha de milho	38
Figuras 12 – Processo de pirólise das biomassas	39
Figura 13 - Curvas termogravimétricas das biomassas	44
Figura 14 – Rendimento de Biocarvão	45
Figura 15 – Curvas termogravimétricas dos biocarvões	46
Figura 16 – Análise Térmica Diferencial.....	48
Figura 17 - Espectros FTIR-ATR para os biocarvões CA, CC, PT, PS, PF e PM.....	49
Figura 18 – Micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.....	51
Figura 19 – Comparação dos teores atômicos antes e depois por EDS	54
Figura 20 – Análise TG para adsorção de CO ₂	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias de Captura de CO ₂	20
Tabela 2 – Adsorventes, vantagens e desvantagens.....	21
Tabela 3 – Mecanismos de adsorção.....	22
Tabela 4 – Composição da casca de café.....	26
Tabela 5 – Parâmetros operacionais e distribuição de produtos de diferentes processos termoquímicos de biomassa.....	29
Tabela 6 – Metodologias empregadas.....	32
Tabela 7 – Teores obtidos por análise química.....	42
Tabela 8 – Resultados SSA, VP e diâmetro médio do poro.....	55
Tabela 9 – Capacidades de adsorção de CO ₂	57
Tabela 10 – Parâmetros dos modelos cinéticos de adsorção ajustados aos dados experimentais de adsorção de CO ₂ pelos biocarvões.....	59

LISTA DE SIGLAS

BET	Método Brunauer-Emmett-Teller
CCS	Carbon Capture Storage
CH ₄	Metano
GEE	Gases de Efeito Estufa
KOH	Hidróxido de potássio
ppm	Partes por milhão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1 Ciclo natural do Carbono.....	16
3.2 Emissões antrópicas.....	18
3.3 Tecnologias de Captura de CO ₂	19
3.4 Biomassas.....	23
3.5 Biocarvão.....	28
3.6 Estado da arte	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 Caracterização de Biomassas.....	32
4.2 Análises Termográficas das biomassas	37
4.3 Procedimentos de preparação do biocarvão.....	37
4.4 Análise Termogravimétrica dos biocarvões.....	39
4.5 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com Transformada de Fourier com reflexão atenuada – FTIR – ATR.....	39
4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura	40
4.7 Definição da área superficial e porosidade	40
4.8 Adsorção.....	40
4.9 Cinética.....	41
4.10 Análise de dados	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1 Caracterização das biomassas.....	42
5.2 Caracterização dos biocarvões.....	45
5.3 Desempenho dos biocarvões para adsorção de CO ₂	55
6. CONCLUSÃO	60
REFERENCIAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas atuais discutido globalmente são as alterações climáticas, que condicionam países a busca e adoção de práticas e desenvolvimento de tecnologias que minimizem esses efeitos causados pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono. Essas emissões somam-se desde o período de industrialização e início do uso de recursos naturais no desenvolvimento da sociedade até os dias de hoje.

Essa sobrecarga de GEE, principalmente de CO₂, gera um desequilíbrio térmico no efeito estufa, aumentando a temperatura média do planeta que desencadeia alterações climáticas em todo mundo como secas, alagamentos, inundações, ondas de calor e frio extremo que corroboram com a destruição de ecossistemas, gerando graves impactos na política e economia (KHOSHRAFTAR, 2023).

No último boletim em 2021, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC emitiu um relatório afirmando que a temperatura média global deverá aumentar 1,5 °C e ainda aponta que medidas além das já utilizadas, deverão ser tomadas para reduzir os níveis de GEE e seus impactos globais (IPCC, 2021).

Diante de tais cenários de mudança, percebe-se uma linha tênue entre as necessidades básicas da sociedade para o progresso da humanidade e a manutenção de recursos naturais de modo a garantir sua disponibilidade a longo prazo. Isso porque a maior parte das emissões advém principalmente da geração de energia por meio de usinas termelétricas e plantas industriais (como siderúrgicas e cimenteiras), que respondem por 45% dos níveis globais de emissões de GEE (Khoshraftar, 2022; Masoumi, 2021).

Nesse sentido, há diversas pesquisas e tecnologias sendo desenvolvidas na área de captura e armazenamento de carbono para mitigar seus efeitos (Guang et al. 2025; Premchand et al. 2024; Liu et al. 2023; Danesh et al. 2023). É fundamental o desenvolvimento dessas tecnologias e, que conciliem processos sustentáveis.

Entre as várias estratégias de captura de CO₂, a adsorção é considerada um método promissor (Guo et al. 2022), em que se destaca o uso da biomassa derivada de resíduos agrícolas para produção de biocarvão com aplicação em diversas áreas. Vários autores consideram tais resíduos como fonte promissora de sorventes carbonáceos, por serem disponíveis e de baixo custo (Yang et al., 2024; Hoang et al., 2022; Lee e Lee, 2021).

Para Li et al., (2024); Zhang et al., (2023) a biomassa, como fonte de carbono renovável e barata, é promissora para reduzir a emissão de carbono em termos de energia alternativa e captura de dióxido de carbono.

Em meio essa problemática o biocarvão, ou do inglês, biochar, possui uma gama de possibilidades conforme a necessidade de uso (Wang, 2019), como aplicação na melhoria dos solos, uso como materiais de eletrodo e armazenamento de energia, uso como filtro para descontaminação de água e gases tóxicos, inclusive na captura do CO₂, alvo desse estudo. O biocarvão preparado a partir da biomassa pirolisada apresenta grande potencial para adsorção de gases, como o CO₂, devido a propriedades como porosidade e área superficial (Zhang et al. 2022). Essa matéria prima ainda pode ser modelada para finalidade de favorecer o processo adsorativo por meio de ativação física ou química que podem potencializar as propriedades citadas anteriormente.

O Brasil, como uns principais países produtores agrícola, possui alta disponibilidade de resíduos agrícolas entre as safras. Sua diversidade de culturas de biomassas permite uma gama de pesquisas de produtos com a finalidade de uso como adsorvente para captura do (CO₂). Além do aproveitamento de resíduos, este estudo aborda a caracterização de diferentes biomassas que poderão auxiliar na compreensão acerca das características e o desempenho do processo adsorativo final dos biocarvões obtidos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comparar o potencial de captura de (CO₂) de biocarvões obtidos da pirólise de seis tipos de biomassas derivadas de resíduos agrícolas utilizando ativação química por hidróxido de potássio.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar as características químicas de cada biomassa precursora (casca de arroz, casca de café, palha de trigo, palha de soja, palha de feijão e palha de milho); para obtenção do biocarvão
- Determinar o rendimento, área superficial e grupos funcionais dos biocarvões produzidos a partir de cada biomassa;
- Estudar os possíveis mecanismos físico/químico de adsorção de CO₂ em cada biocarvão produzido e compará-las com outras encontradas na literatura;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Ciclo natural do Carbono

O carbono é um dos elementos mais abundantes no planeta. Seja na atmosfera, no solo, no oceano ou de forma geológica, é encontrado carbono em qualquer um desses sistemas, pois, estão interligados e realizam trocas deste entre si, o que permite ao carbono ter um ciclo natural (Agnesini, 2012). É um elemento de grande importância e que em suas composições gasosas como dióxido de carbono ou gás carbônico (CO_2) e o metano (CH_4) ajudam a compor os GEE (Gases de Efeito Estufa) que contribuem para o equilíbrio natural da temperatura no planeta. Porém com o aumento das emissões provocado por atividades industriais tem causado um desequilíbrio nos processos biogeoquímicos naturais e que resultam em alterações climáticas.

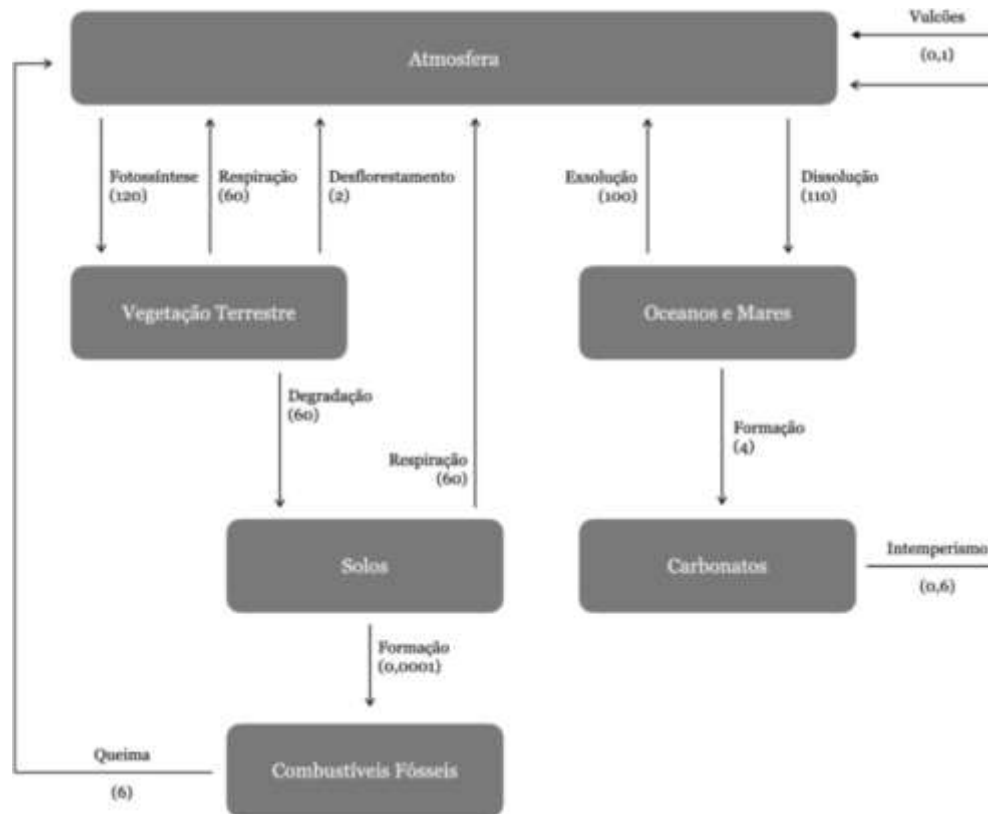
Esses processos biogeoquímicos descrevem fluxos e transformações dos elementos químicos essenciais à vida entre os diferentes compartimentos da Terra, são compostos por processos biológicos que incluem a biosfera e processos geológicos que incluem atmosfera, litosfera e hidrosfera apresentados na Figura 1 (Rackley 2010).

Uma das formas de mensurar quantidades de emissões, principalmente o dióxido de carbono que é um dos gases mais impactantes dos GEE, é por meio de inventários. Segundo Rackley:

Os inventários de carbono na atmosfera, biosfera, solos e rochas, e os oceanos estão ligados por um conjunto complexo de processos biogeoquímicos naturais e antropogênicos que são conhecidos coletivamente como ciclo do carbono. (Rackley, 2010, p.05)

A Figura 1 mostra de forma simplificada o inventário, em números, e os fluxos de CO_2 entre sistemas.

Figura 1- Fluxograma simplificado do ciclo biogeoquímico global do carbono (fluxos em Tg ano⁻¹).



Fonte: NUNES et al., O Solo, USP, 2022

Nunes et al. (2022) ainda citam que a atmosfera atua como principal reservatório dos elementos gasosos como o carbono. Nesses casos, os compostos circulam predominantemente na forma gasosa, permitindo uma redistribuição relativamente rápida em escala global. Esse comportamento torna os ciclos gasosos particularmente sensíveis às mudanças ambientais e à interferência antrópica, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa.

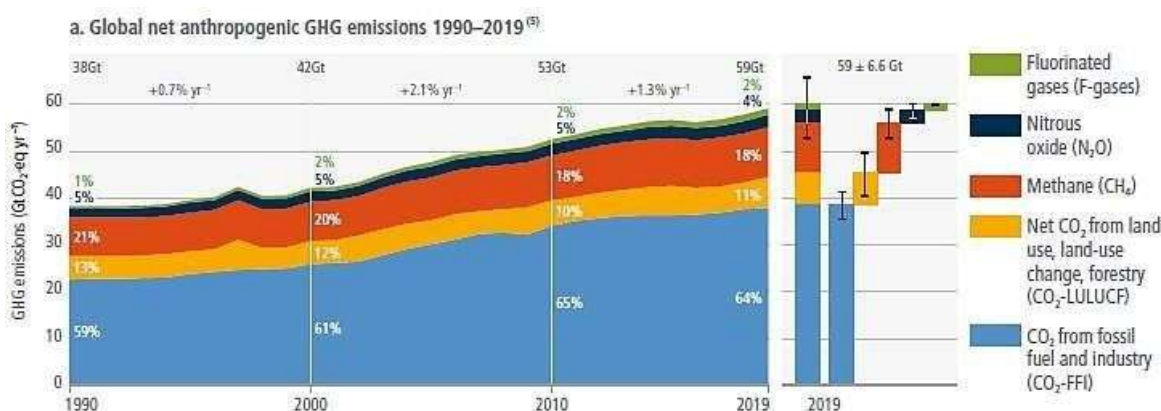
Dessa forma, o ciclo natural dependente de sumidouros naturais, como florestas. Porém, com o desmatamento, o CO₂ acaba ficando em excesso no ciclo e contribui para que o balanço final alcançasse em 2024, a média global de dióxido de carbono 422,8 ppm (*National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA, 2024), com influências diretas de atividades antrópicas nos últimos anos (Dissanayake et. al 2020; Jang et. al 2018; Rashidi e Yusup, 2015; Lee, 2014).

3.2 Emissões antrópicas

Devido as constantes emissões advindas de processos antropogênicos, o meio ambiente não consegue absorver toda quantidade de GEE. Esse desequilíbrio no efeito estufa natural altera os níveis de absorção de energia solar, que resultam no aquecimento global. Desde a revolução industrial, o CO₂ vem sendo o maior contribuinte para esse forçamento (Pan et al. 2024, IPCC, 2022).

A atividade humana, além de intensificar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, tem comprometido significativamente a capacidade dos sistemas naturais de absorção e sequestro desse gás (Khoshraftar et al. 2023). Intervenções como o desmatamento e a degradação dos ecossistemas marinhos reduzem a eficiência de importantes sumidouros de carbono, como as florestas e os oceanos (Chen, 2017). Na Figura 2, pode ser visto um histórico da evolução de emissões antropogênicas de GEE e principalmente do (CO₂) no intervalo de 1990-2019, publicado no último relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC):

Figura 2 - Emissões antrópicas líquidas globais de GEE de 1990 a 2019.



De acordo com a Figura 2, em quase 30 anos, houve um aumento de 59% para 64% de dióxido de carbono na atmosfera derivado de combustíveis fósseis e indústria, seguido pelo emitido devido a mudanças no uso do solo como florestas, plantações, e os demais gases como metano derivados da mesma origem.

Pode-se inferir que o crescimento populacional, associado às mudanças nos estilos de vida e ao aumento das demandas por bens e serviços, têm impulsionado uma maior exploração dos recursos naturais. Essa exploração contínua, intensificada ao longo dos anos, contribui de forma significativa para o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Atualmente, apesar de todos os esforços, os combustíveis fósseis ainda representam cerca de 80% da matriz energética mundial, evidenciando a forte dependência de fontes não renováveis e intensivas em

carbono (Dale, 2021).

Ainda conforme o último relatório técnico do IPCC de 2022:

as emissões da indústria, dos edifícios e dos transportes são impulsionadas, respectivamente, pelo grande aumento da procura de materiais básicos e produtos manufaturados, por uma tendência global de aumento da área útil per capita, pela utilização de serviços energéticos nos edifícios, pelas distâncias percorridas e pelo tamanho e peso dos veículos (IPCC, 2022).

Nesse contexto, diversas tecnologias voltadas ao desenvolvimento de processos mais sustentáveis como a melhoria da eficiência energética e o uso de biocombustíveis têm sido integradas às estratégias de captura e armazenamento de carbono (CCS), bem como à bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS), com crescente aprofundamento em pesquisas.

Entre as principais abordagens para mitigar as emissões globais de CO₂ destacam-se o aumento da eficiência energética, a expansão da matriz energética renovável, a implementação de políticas como o mercado de carbono, ações de reflorestamento, conservação de florestas e pastagens, além da captura de CO₂ em usinas termelétricas e outras fontes industriais (Núñez, 2019).

3.3 Tecnologias de captura de CO₂

Atualmente, entre as alternativas disponíveis para a mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO₂), a captura e armazenamento de carbono (CAC), do inglês *Carbon Capture and Storage* (CCS), destaca-se como uma das mais promissoras tecnologias, especialmente no contexto da transição para uma matriz energética mais limpa. Essa abordagem é amplamente reconhecida por seu potencial em contribuir significativamente para o cumprimento das metas climáticas globais, ao possibilitar a continuidade do uso de usinas termelétricas a combustíveis fósseis com a consequente redução das emissões de CO₂ para a atmosfera (Hong, 2022; Bui et al., 2018; Boot- Handford et al., 2014).

Dentre os processos mais conhecidos de captura estão o de pós-combustão, que ocorre após a queima de combustível e o CO₂ está diluído em meio aos gases de exaustão; processo de oxi-combustão, que envolve a combustão em oxigênio puro em vez de nitrogênio e ar; e processo de pré-combustão, que envolve a captura do CO₂ antes da queima do combustível. As tecnologias podem ser usadas em determinados processos e envolvem diferentes mecanismos:

- Absorção química: envolve o uso de solventes líquidos como aminas (Monoetanolamina - MEA) para absorver CO₂, é “amplamente usada devido à sua seletividade e eficiência na

captura de CO₂ em gases diluídos” (Xiao et al. 2021, Boot-Handford et al., 2014). É a tecnologia mais madura para uso no pós-combustão, porém apresenta desvantagens operacionais e ambientais.

- Separação por membranas: consiste no uso de materiais poliméricos ou cerâmicos seletivos que facilitam a passagem de CO₂ em relação a outros gases.
- Destilação criogênica: envolve o resfriamento do gás até a liquefação seletiva do CO₂. O que demanda alto gasto energético.
- Processo de Chemical Looping: “reduz o trabalho de separação por produzir CO₂ isolado da corrente gasosa” (Abad et al., 2007) devido ao fornecimento de oxigênio puro ao combustível por óxidos metálicos, gerando CO₂ puro.
- Hidratos de gás: consistem na formação de estruturas cristalinas com o CO₂ sob alta pressão e baixa temperatura.
- Adsorção física/química: Utiliza-se de materiais como zeólitas, MOFs (*Metal Organic Frameworks*), e carvões ativados no qual o CO₂ é adsorvido em superfície porosa e envolve interações de área superficial.

A Tabela 1 a seguir apresenta a relação entre os processos industriais citados e as tecnologias descritas.

Tabela 1 – Tecnologias de Captura de CO₂

Tecnologia	Pré Combustão	Oxi Combustão	Pós Combustão
Absorção química	✓		✓
Adsorção física/química	✓		✓
Destilação criogênica	✓	✓	✓
Separação por membranas	✓	✓	✓
Formação de hidratos	✓		✓
Chemical looping		✓	✓

Fonte: Da autora, 2025

Diferentemente do processo de absorção, em que o componente absorvido penetra no volume do solvente formando uma solução homogênea, no processo de adsorção, as moléculas do adsorvato se fixam na superfície do material sorvente. A Tabela 2 a seguir aponta os materiais adsorventes com suas vantagens e desvantagens:

Tabela 2 – Adsorventes, vantagens e desvantagens.

Adsorvente	Vantagens	Desvantagens	Referências
Sílica com aminas	Alta capacidade de adsorção; estabilidade térmica e química	Requer funcionalização para desempenho ideal; podem degradar após múltiplos ciclos	Lee et al., 2018
Zeólitas	Boa seletividade; abundância	Baixa performance acima de 30 °C; alta demanda energética para regeneração	Kumar et al., 2020; Nie et al., 2018
MOFs (estruturas metal-orgânicas)	Alta área superficial e capacidade de adsorção	Instáveis em presença de impurezas ou umidade; elevados custos de produção	Younas et al., 2020
Biocarvão	Custo baixo; estabilidade térmica e química; produzido de biomassa residual e renovável.	Eficiência depende da matéria-prima e condições de pirólise; desempenho inferior aos MOFs	Lee et al., 2020; Xue et al., 2022

Fonte: Adaptado pela autora 2025

A incorporação de materiais adsorventes à biomassa pirolisada favorece a remoção de poluentes por meio de interações superficiais específicas (Rashid et al., 2021, p. 9050– 9066). A heterogeneidade da superfície dos adsorventes utilizados pode direcionar o tipo de interação com os compostos adsorvidos, resultando em diferentes mecanismos de adsorção, como fisorção (interações fracas, geralmente de Van der Waals) ou quimissorção (ligações químicas com transferência eletrônica) (Manchisi et al., 2020, p. 2118). Essas especificidades de adsorção são representadas na Tabela 3, conforme ilustrado por Rackley (2010).

Tabela 3 – Mecanismos de adsorção

Adsorção Física	Adsorção Química
Forças de Van der Waals	Forças comparáveis a ligações químicas primárias
Baixo calor de adsorção	Alto calor de adsorção
Não há alteração da espécie adsorvida	A espécie sofre alteração transformando-se em outra espécie
Quantidade adsorvida depende mais do adsorvato do que do adsorvente	Quantidade adsorvida depende tanto do adsorvato quanto do adsorvente
Normalmente ocorre em temperaturas abaixo do ponto de ebulição do adsorvato	Acontece em altas temperaturas
Baixa energia de ativação	Alta energia de ativação
A adsorção pode acontecer em multicamadas	A adsorção ocorre só em monocamadas

Fonte: Adaptado pela autora. Fonte: GUO, 2022

Como mostrado na Tabela 3, as vias físicas estão diretamente interligadas a estrutura como área superficial disponível, porosidade, estabilidade, ao passo que nas vias químicas relaciona-se aos grupos funcionais, energia de ativação, disponibilidade de sítios geralmente em altas energias. Na área de interface onde a adsorção acontece, as fases podem ser sólidas, líquidas e gasosas. Dessa forma a adsorção na interface entre uma fase sólida e uma fase gasosa, é regida fundamentalmente por interações físico-químicas. Tais interações determinam a energia de ligação e a força atrativa entre moléculas do adsorbato (gás) e a superfície do adsorvente (sólido), sendo, portanto, o fator decisivo para que o processo de adsorção seja favorecido ou não.

Dentre as tecnologias citadas, a adsorção é considerada menos dispendiosa e oferece maior praticidade em diferentes condições operacionais, inclusive já implantadas, comparada a outras tecnologias (Khoshraftar, 2023). Liu et al. (2020, p. 117526) relatam que a técnica da adsorção vem ganhando destaque nos últimos anos.

Nesse cenário, as principais características promissoras do biocarvão na adsorção de CO₂ estão relacionadas as interações superficiais, estabilidade térmica, química, os custos serem atrativos e processo sustentável, além da possibilidade de serem modelados por processo de ativação levando a melhoria de suas características superficiais e eficiência como adsorvente

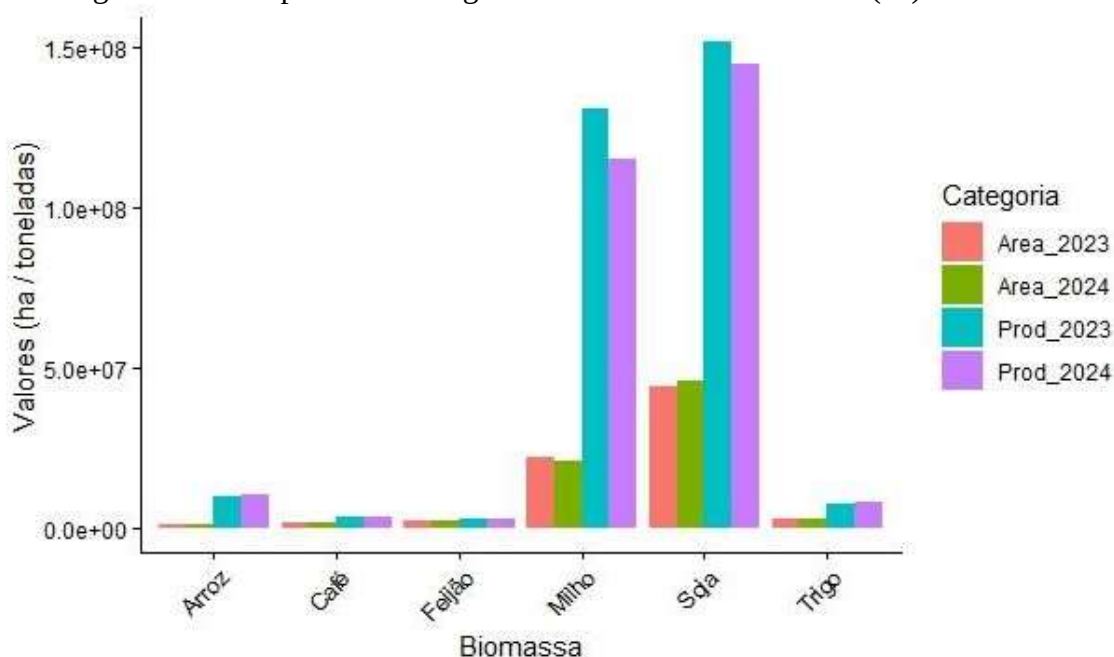
(Zhang, 2022). Embora sua performance esteja diretamente relacionada às condições de pirólise e à natureza da biomassa utilizada (Lee et al., 2020; Xue et al., 2022), o biocarvão representa uma solução alinhada aos princípios da bioeconomia e da valorização de resíduos agroindustriais.

3.4 Biomassas

O termo *biomassa* designa toda matéria orgânica de origem vegetal, não fóssil e biodegradável, obtida por meio de processos naturais ou antropogênicos, que pode ser utilizada como fonte de energia (Kumar et al., 2024). A biomassa vegetal, por sua vez, é uma das mais abundantes e relevantes do planeta, destacando-se por sua capacidade de realizar fotossíntese e atuar como sumidouro de dióxido de carbono durante seu ciclo de vida.

O uso de biomassas derivada de resíduos agrícolas é apresentado como alternativa de baixo custo por utilizar resíduos de colheitas, não oferecendo riscos a segurança alimentar, e evitando que seu descarte seja realizado de forma irregular. As estimativas anuais de geração de resíduos agrícolas estão em torno de 1 bilhão de toneladas em todo o mundo (Peng et al. 2023; Karić et al. 2022). Frente a esse desafio, a biomassa de resíduos agrícolas tem sido foco de estudos devido a ampla produção agrícola no Brasil (Figura 3), e se mostrado excelente alternativa energética como na produção de bio óleo e biocarvão, que mostra ótimas características nas capacidades adsorptivas de carbono.

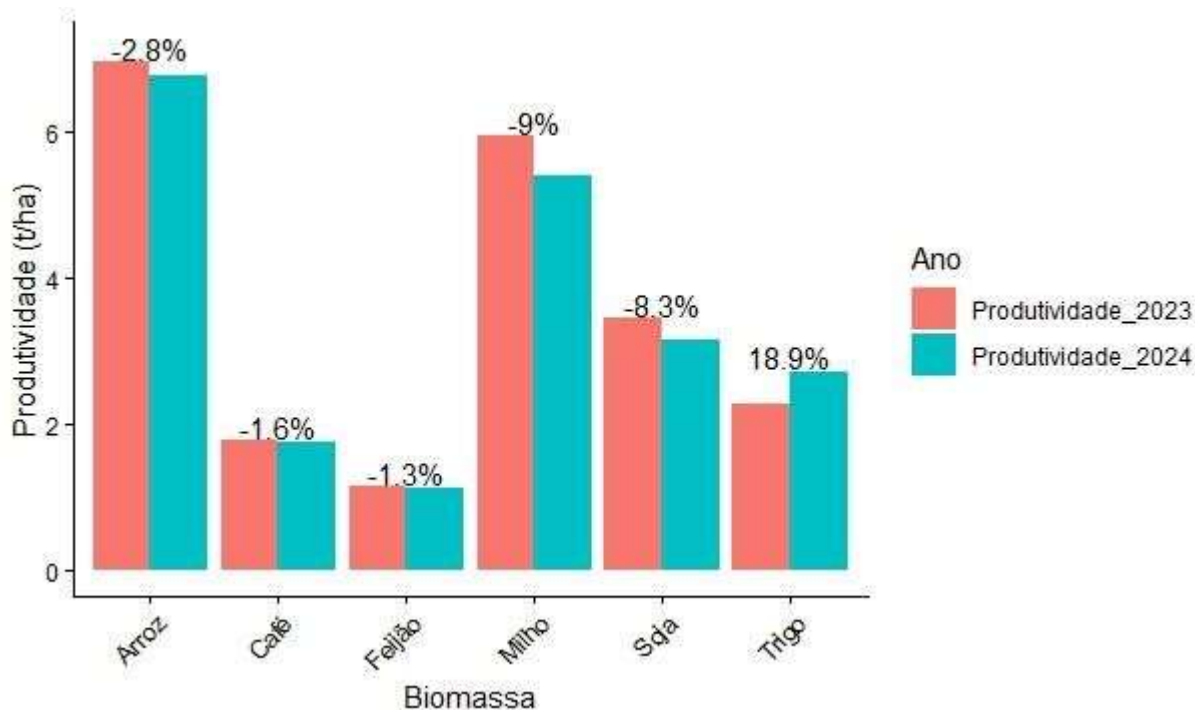
Figura 3 – Principais culturas agrícolas x área colhida hectares (ha) 2023/2024.



Fonte: IBGE, 2023

A Figura 4 representa a quantidade produzida por cada hectare de cultura entre as safras de 2023 e 2024.

Figura 4 – Produtividade (t/ha) por Biomassa 2023/2024.



Fonte: IBGE, 2023

Os dados observados nas Figura 3 e 4, juntamente com os obtidos através do último boletim informativo da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), representam uma parte das maiores culturas produzidas no país e dão uma noção em relação a produção de resíduos. Apesar de uma ligeira redução entre safras 2023 e 2024 identificadas na Figura 4 com sinal negativo, os valores obtidos e divulgados até meados de 2025 e expectativa para o fechamento do respectivo ano são de aumento para as produções (IBGE, 2024).

As composições de biomassa desempenham um papel vital na área de superfície e porosidade do biocarvão. Diferentes matérias-primas possuem minerais inorgânicos variados e teores de carbono orgânico e especiação. Metais alcalinos e metais alcalino-terrosos na biomassa podem servir como auto-ativador para o desenvolvimento de poros durante a pirólise (Leng et al. 2021).

Os resíduos podem variar entre palhas e cascas. As palhas são hastes secas de plantas (OED, 2025) derivadas originalmente dos caules e folhas, que apresentam em sua composição maior teor de hemicelulose, principalmente em hemicelulose, que contribui para uma estrutura

menos densa e mais leve. Possuem também menor teor de cinzas e geram consequente menores resíduos minerais, o que é favorável para que não haja entupimento de poros durante o processo de pirólise (Vaughn et al., 2013; Rodrigues et al., 2023).

Já as cascas são um tegumento natural, ou revestimento externo (OED, 2025) com função protetiva que apresentam diferentes características como, por exemplo, a casca de arroz que é rica em sílica e produz alto teor de cinzas no processo pirolítico, podendo comprometer certas características que se espera no biocarvão como a proporção de carbono e encobrimento de poros (Xu et al 2022). As cascas tendem a possuir maior proporção de lignina que contribui para maior estabilidade térmica do que as palhas.

Casca de arroz

A estrutura da casca de arroz é rica em nano-sílica, que pode funcionar como um modelo natural para o desenvolvimento de uma estrutura porosa (Shen 2022). O carbono está presente em sua estrutura lignocelulósica sob a forma de lignina, celulose e hemicelulose, enquanto a sílica, em alta concentração, é majoritariamente encontrada nas cinzas após a queima do material. Ela apresenta estrutura tetraédrica na qual grupos -OH da superfície podem se dividir de diferentes formas. O carbono é captado da atmosfera pelas plantas por meio do processo de fotossíntese, ao passo que o silício é absorvido pelas raízes do arroz em forma solúvel, provavelmente como silicato ou ácido monossilícico. Uma vez absorvido, o silício sofre processos de biomineralização, integrando-se à matriz da parede celular para formar uma rede complexa e conectada de lignocelulose e sílica (PODE 2016).

Dessa forma os grupos funcionais superficiais tanto nas cinzas quanto nos biocarvões, são observadas principalmente ligações siloxano (Si-O-Si) e silanol (Si-OH), além de Si-H, -NH, C-H, C=O, C-O -OH e C-OH (Ahmaruzzaman; Gupta, 2011; Lakshmi et al., 2009; Mobarak et al., 2019; Sharma et al., 2010; Tabassam et al., 2022).

O alto teor de elementos alcalinos, como sódio (Na) e potássio (K), assim como a presença de fósforo na casca e na palha de arroz, contribui para a redução da temperatura de fusão das cinzas geradas durante sua queima ou pirólise. Essa característica, embora inerente à composição do material, pode resultar em efeitos como a incrustação ou a corrosão entre as superfícies de troca térmica. Além disso, a baixa temperatura de fusão das cinzas da casca de arroz favorece a formação de aglomerados em sistemas de leito fluidizado, comprometendo a eficiência do processo e a integridade operacional dos reatores (Armesto et al. 2002, Da Silva et al. 2023).

Casca de café

De acordo com a ABIC – Associação Brasileira da Indústria do Café, o café é uma planta silvestre de origem Etíope e que aportou em solo brasileiro em meados de 1727 no Pará. Atualmente as principais qualidades produzidas são o café arábica e conilon (robusta). O café pertence ao grupo de metil-xantinas. Segundo Caielli (1984), citado por Silva (2019), a biomassa do café é composta quimicamente por:

Tabela 4 – Composição da casca de café (continua).

Composição	Quantidade (%)
Cafeína	0,8
Taninos	1,6
Matéria seca	87,9
Proteína bruta	9,4
Extrato etéreo	2,5
Matéria mineral	6,5
Cálcio	0,5
Fósforo	0,12
Potássio	1,4
Lisina	0,034
Metionina	10,3
Cistina	10,3
Fibra em detergente neutro	62,1
Celulose	15,1
Lignina	9,3
Hemicelulose	4,3

Fonte: SILVA 2019 adaptado pela autora

A literatura apresenta uma ampla variabilidade em relação a esses teores apresentados na Tabela 4 devido a condições de clima e solo (Ferreira, 2023; Caetano, 2021, Janissen e Huynh, 2018; Jiménez-Zamora et al. 2015) porém, sempre destacando sua estrutura lignocelulósica formada por polímeros aromáticos e policíclicos.

Palha de trigo

O trigo é uma gramínea do gênero *Triticum*, e é um dos cereais mais cultivados mundialmente. É constituído por cerca de 17 – 19% lignina, 59 – 70% de holocelulose (33-38% de celulose e 26-32% hemicelulose) e 6 a 8% de cinzas (Saini et al. 2015, Kuhad e Ericksson, 1997; Reddy e Yang, 2005; Li et al. 2010).

A palha de trigo possui uma quantidade significativa de pectina e proteínas (Sarkar et al. 2012). Entre os elementos constituintes da palha de trigo estão compostos como potássio e sílica que geralmente estão em maior proporção, como também o cálcio, o fósforo, o cloro e outros

elementos inorgânicos (Zhu et al., 2018; Jensen et al., 1998; Wang et al, 2012).

Palha de soja

A produção de soja (*Glycine Max*) tem aumentado cada vez mais ao ano e é uma das principais culturas de suprimento nutricional para necessidades tanto humanas quanto para criações (Singh e Krishnaswamy 2022). E ainda é utilizada entre safra por possuir um mecanismo que pode promover a fixação de N atmosférico no solo beneficiando as culturas sucessoras (Pereira et al. 2011, Mascarenhas et al. 2001, Mercante 2003). Diferente de outras culturas, a soja é simbiótica com rizóbios (como *sinorhizobium fredii*), que podem absorver N₂ atmosférico de modo contínuo, contribuindo para redução de NH₃ e o crescimento da soja (Borja Reis et al. 2021).

A palha de soja, composta de caules, folhas e vagens possui em sua composição estrutural cerca de 52% de holocelulose (35% de celulose e 17% de hemicelulose), 21% de lignina insolúvel em ácido, e 1% de lignina solúvel em ácido (Martelli-Tosi et al. 2017, Sugato Panda e Mayur Shirish 2025). Possui extrativos entre 6- 11%, cinzas entre 5- 11% e 10 a 12% de outros compostos como proteína, pectina, grupos acetil e substitutos de ácido glucorônico (Tapia – Blácido et al. 2017, Cabrera et al. 2015, Wan et al. 2011), compostos fenólicos (isoflavonas de soja) e saponinas de soja (Fenwick & Oakenfull, 1983; Jackson et al., 2002, Takao Nagano et al. 2020).

Palha de feijão

O feijão pertence ao gênero *Phaseolus*, sendo o tipo *Phaseolus Vulgaris* o tipo mais consumido na alimentação brasileira. É uma leguminosa da família *Fabaceae*, a mesma da soja, adaptável ao clima e diferentes solos o que permite que o Brasil consiga três safras anuais de acordo com o CONAB (2019).

É relatado na literatura além da celulose, hemicelulose e lignina, altas proporções de oxigênio (46,36%), carbono (42,01%), nitrogênio (5,89%) e teor de proteína (8,44%) em sua composição (Santos et al. 2020; Ozyuguran et al. 2018; Cai et al. 2017).

Palha de milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma gramínea de elevada importância econômica e social, amplamente cultivada no Brasil tanto para alimentação humana quanto animal (EPE, 2014). No

entanto, além do grão, o cultivo do milho também gera resíduos lignocelulósicos significativos, como o sabugo e a palha, os quais apresentam grande potencial para aproveitamento energético (Ohara et al., 2016; Vale et al., 2013). De acordo com esses autores, a palha do milho apresenta densidade energética mais que duas vezes superior à do caule e das folhas, o que a torna particularmente atrativa para aplicações como biomassa sólida em processos de conversão térmica.

A composição das fibras lignocelulósicas contém principalmente lignina, celulose (polissacarídeo formado por unidades de monossacarídeos β -D glucose (1 $\rightarrow$ 4)), polioses ou hemicelulose (polímero de pequena massa molecular formado por uma variedade de unidades de açúcar, como β -D-xilose, β -D-manose, β -D-arabinose, entre outros) e outros constituintes em menores teores (Nathalia et al. 2020; Biermann, 1996). A literatura relata teores para holocelulose em torno de 53,25% (34,72% para celulose e 18,53% para hemicelulose) e entre 7,63% - 20,12% de lignina (Zhang et al. 2025; Casara et al. 2017).

Wang et al. (2025) conduziram um estudo no qual avaliaram o efeito das cinzas sobre a evolução da estrutura porosa das partículas de carvão derivado da palha de milho, durante o processo de pirólise realizado em altas temperaturas e sob baixa taxa de aquecimento. Como parte da metodologia empregada, foi realizada a análise elementar da biomassa, a qual permitiu identificarem os seguintes percentuais: carbono (48,48%), hidrogênio (6,03%), oxigênio (40,93%), nitrogênio (0,68), S (enxofre) (0,13%), cálcio (0,83%), Na (sódio) (0,01%), K (potássio) (0,63%), magnésio (0,39%), alumínio (0,24%), ferro (0,04%), sílica (1,03%) e cloro (0,58%).

3.5 Biocarvão

O Biocarvão, também conhecido como biochar, é um dos adsorventes promissores de dióxido de carbono, também citado no relatório técnico do IPCC 2022 com alto potencial benéfico diante a adaptação e mitigação das alterações climáticas.

Para a International Biochar Initiative (IBI), biocarvão é um produto derivado da combustão termoquímica de biomassas em ambiente controlado e ausência de oxigênio (IBI, 2023). O tratamento termoquímico que a biomassa passa para obtenção de carvão envolve métodos comuns como pirólise, gaseificação e carbonização hidrotérmica, porém somente a pirólise atende à definição de biocarvão (Wang e Wang, 2019).

O que difere os produtos e processos, além das propriedades da matéria prima, são as condições de pirólise, que incluem: temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência.

Desso modo os processos resultam em diferentes produtos e influencia em suas características, como no caso do biocarvão (Kamobo e Dutta, 2015; Xu et al., 2015; Ahmed et al., 2016; Cha et al., 2016; Inyang et al., 2016; Tripathi et al., 2016) e outros produtos, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros operacionais e distribuição de produtos de diferentes processos termoquímicos de biomassa.

Tipos de processos termoquímicos	Temperatura de reação (°C)	Taxa de aquecimento (°C/ min)	Tempo de residencia	Tamanho (mm)	Biocarvão rendimento	Principais produtos
Pirólise lenta (Ronsse et al., 2013)	400-500	5-7	>1h	5-50	25-35	sólido
Pirólise rápida (Ansari et al., 2021)	850-1250	6.000-12.000	<2s	<1	10-25	Líquido
Pirólise intermediária (Yang et al., 2017; Choi et al., 2013)	400-650	60-600	10-30s	1-5	25-40	Líquido sólido e gás
Flash pirólise, (Cornelissen et al., 2008)	>1000	>60.000	<1s	<0.5	10-25	Sólido
Gasificação	>500	1-50	10-20s	0.2-10	5-10	Gás

Fonte: GUO, 2022

De acordo com a Tabela 5, o melhor rendimento para obtenção do biocarvão é por meio de pirólise intermediária (25-40) porém os tempos de residência e taxa de aquecimento tendem a produzir mais produto líquido e gasoso. A pirólise lenta em temperatura na faixa de 400-500 °C a uma taxa de aquecimento de 5 a 7°C por minuto, conforme definido também por Bridgwater (2012), que comparando entre a pirólise rápida e a lenta, mostrou que essa ultima apresenta maior rendimento de biocarvão em relação as demais. Este também é corroborado por (Daful e Chandrarantne 2018) a pirólise lenta tende a produzir maiores proporções de biocarvão

devido às baixas taxas de aquecimento e tempos de residência mais longos.

3.6 Estado da arte

Diversos países têm direcionado estudos com foco na captura de carbono e desenvolvimento de biocarvão modificados com características que favoreçam sua adsorção. Entre os principais estudos observados por meio de busca na base de dados SCOPUS, num intervalo de 5 anos, encontram-se o desenvolvimento de materiais com características que possibilitem a captura de carbono, com termo “*carbon capture*” com 54.631 publicações, e “*biochar*” com 41.325 publicações, desses apenas 998 publicações com termo “*biochar and carbon capture*”.

Dentre os que se destacam, China, Índia e Reino Unido lideram com pesquisas mais recentes nos processos de conversão de biomassas derivadas de resíduos agrícolas para uso na captura do carbono através da adsorção (Ding et al., Dissanayalke et al., Igalavithana et al., Cheng et al. 2020; Kamran et al., Sri Shalini et al., 2021; Yuan et. al., 2022).

O uso de biomassas agrícolas é apresentado como alternativa de baixo custo por utilizar resíduos de colheitas, não oferecendo riscos a segurança alimentar, e evitando que seu descarte seja realizado de forma irregular. Outros estudos também têm sido conduzidos em relação a modificações nas propriedades do biocarvão para aumentar a capacidade de adsorção, como observou Xiao et al. (2022), que utilizaram ativação química para melhorar a área superficial específica e aumentar a disponibilidade de sítios superficiais em relação ao biocarvão puro (Wang e Wang, Kuang 2019; Shen et al., 2020, Sharma et al., 2021, Xiao et. al, 2022; Zhang et al., 2022, Li et al., Danesh et al., 2023). A ativação pode ser realizada antes da pirólise ou pós pirólise, mas após a pirólise a demanda de energia e tempo é maior (Lee et al. 2021).

Em um de seus estudos, Shen et al. (2019) produziram biocarvão de alto desempenho a partir de casca de arroz, utilizando ativação química com hidróxido de potássio (KOH) em proporções de massa equivalentes. Os autores observaram que o aumento da alcalinidade superficial do biocarvão está diretamente relacionado tanto à matéria-prima empregada quanto aos métodos de preparação utilizados, demonstrando a influência decisiva desses fatores nas propriedades físico-químicas do material final. O foco é o aumento da área superficial e porosidade, além da modificação dos grupos funcionais da matéria prima. Em comparação com a modificação ácida, a modificação alcalina geralmente apresenta melhor aumento da área superficial do biocarvão (Wang e Wang, 2019).

Os parâmetros fundamentais para adsorção estão diretamente relacionados a área superficial específica, volume e tamanho dos poros devido ao tamanho da molécula de CO₂ como demonstrou Liu et al., (2020) e outros autores que o tamanho de poro ideal para captura deve ser <0,9 nm.

Zhang et al. (2022) utilizaram biocarvão de bambu ativado por hidróxido de potássio, por meio de impregnação física seguida de pirólise a 700° C por 1h. O material obtido mostrou melhoria nas propriedades do biocarvão com aumento da área de superfície e consequente aumento do desempenho na adsorção de CO₂, (4,182 mmol/g, 62,38%) em relação ao biocarvão não ativado (2,522 mmol/g, 37,68%).

Além da ativação química, Li et al. (2023) enfatizaram a necessidade de definição e estudo de outros parâmetros que influenciam na qualidade e no rendimento do biocarvão, além da temperatura de pirólise e da taxa de aquecimento, como a taxa de fluxo de gás, o modelo de reator utilizado, a pressão do reator, condições de operação do reator, o uso de catalisador, entre outros. Esses fatores reforçam a necessidade da compreensão da constituição da matéria prima e a definição da aplicação final do produto para definir o melhor processo de produção de biocarvão. Porém, entre a ativação física e a química, esta última, é mais economicamente viável por requerer menor tempo de processamento, redução na temperatura de ativação e geração de carvão ativado poroso de alta qualidade (Premchand et al. 2024, Patra et al., 2021).

Em um de seus estudos com biocarvão à base de palha de resíduos agrícolas (trigo, milho, arroz), Zhang et. al. (2020) observou que o rendimento diminuiu expressivamente com o aumento da temperatura de pirólise acima de 400°C. O autor ainda recomendou um tempo de residência na faixa de 5 a 90 minutos para pirólise lenta. Outros autores como Zhu et. al. (2021) constataram em outro estudo que a temperatura é importante parâmetro para determinação do rendimento do biocarvão além de definir características como volume de poros e área superficial que afetam diretamente no processo de adsorção.

Esse fenômeno foi investigado por Li et al., (2023) e Guo et. al (2022) que concluíram que em temperaturas mais altas ocorre um alargamento entre os poros e uma coalescência dos poros adjacentes, reduzindo seu volume e devido também a decomposição da matéria na queima diminuindo a capacidade de captura de CO₂. Foi relatado também por Li et al. (2024) e Zhang et al. (2022) o processo de pirólise em duas etapas como favorável a regulação de uma estrutura hierárquica porosa.

Importante ressaltar também que apesar da necessidade de alto investimento em instalações em escala devido a ajuste como para realização da pirólise, estudos de análise

técnico econômica em cenários hipotéticos tem sido realizados e demonstram excelente custo benéfico em relação a redução das mudanças climáticas, sequestro de carbono e possibilidade de negociação de créditos de carbono. Além disso, o uso do biocarvão como fertilizante no solo pode aumentar em até 50% o rendimento dos grãos (Haeldermans et. al., 2020; Ijaz et al., 2019).

Com base nos artigos anteriormente estudados, definiu – se para essa pesquisa o estudo de biomassas agrícolas submetidas a processo de ativação química para produção de biocarvão e comparação em relação ao desempenho como possíveis adsorventes para captura de CO₂.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Tendo como base os dados observados pelo IBGE e CONAB, serão utilizadas no estudo os resíduos agrícolas da produção de arroz, café, feijão, milho, soja e trigo conforme possibilidade de alta disponibilidade pós safras. Entre os tipos de resíduos a serem estudados estão as palhas e as cascas. A coleta das biomassas dos resíduos agrícolas de palha de milho, palha de soja, casca de café, casca de arroz e palha de trigo ocorreu na região do município de Piumhi – MG. Os resíduos foram expostos ao sol para remoção de possível umidade e levados para o Laboratório de Materiais Nanoestruturados da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Para melhor referência, os biocarvões foram denominados conforme sua biomassa em CA – Casca de Arroz, CC – Casca de Café, PT – Palha de Trigo, PS – Palha de Soja, PF – Palha de Feijão e PM – Palha de Milho.

4.1 Caracterização das biomassas

A análise química elementar foi realizada no laboratório da Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) no Departamento de Engenharia de Biomateriais e no Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa (LAMBEB) da Universidade Federal de Lavras:

Tabela 6 – Metodologias empregadas.

Extrativos totais	NBR 14853 (ABNT, 2010)
Lignina insolúvel	NBR 7989 (ABNT, 2010)
Teor de cinzas	NBR 13999 (ABNT, 2003)
Holocelulose	Browning (1963)

Fonte: Da autora (2025)

Os componentes químicos foram quantificados com base na massa seca do material. Mesmo seco em estudo é importante a verificação da umidade sempre em cada etapa para garantir a confiabilidade da análise.

A umidade é dada pela seguinte equação 1:

$$U_{bs} = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

U_{bs} → Umidade da amostra base seca (%)

Mu → Massa úmida (g)

Ms → Massa seca (g)

Extrativos

Os extrativos são compostos que não fazem parte dos componentes estruturais da parede celular e podem ser extraídos de materiais lignocelulósicos, tanto por solventes polares quanto por apolares (Morais et al. 2010, Da Silva et al. 2023).

A quantificação dos extrativos totais foi feita de acordo com a norma NBR 14853 (ABNT, 2010) em duplicata. Para o procedimento foi utilizado 4,0 g de biomassa em filtros de papel com extração utilizando tolueno-etanol acetona (2:1) por aproximadamente 6 horas, extrator modelo Soxhlet (figura 5), e por último uma extração final com água quente. Ao final, o cadinho poroso contendo a amostra livre de extrativos é levado à estufa calibrada a 105 ± 2 °C.

A porcentagem de extrativos foi determinada de acordo com a equação:

$$Ext(\%) = \frac{Mi - Mf}{Mi} \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

Ext → Teor de extrativos totais em %

Mi → Massa inicial (g)

Mf → Massa da amostra livre de extrativos, em gramas (g)

Figura 5 – Quantificação de teor de extrativos.



Fonte: Da autora (2025)

Lignina insolúvel em ácido

A quantificação da lignina foi realizada conforme a norma NBR 7989 (ABNT, 2010). As biomassas livres de extrativos (2,0 g) foram dispostas em um béquer e foi adicionado H_2SO_4 (ácido sulfúrico pipetado) (15 ml por amostra) 72% por um período de 2 horas em banho-maria a temperatura ambiente. Após esse tempo foram adicionados 400 ml de água deionizada as amostras, fervidas durante 4 horas (o volume foi mantido adicionando água nesse período) e depois filtradas em cadinhos porosos forrados com polpa de celulose em bomba de vácuo Primatec®.

Ao final, o cadinho contendo a amostra foi levado à estufa calibrada a $105 \pm 2^\circ\text{C}$. O teor de lignina foi determinado de acordo com a equação 3:

$$Tlig(\%) = \frac{M_{lignina}}{M_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

$Tlig(\%) \rightarrow$ Teor de lignina (%)

$M_{lignina} \rightarrow$ Massa seca de lignina (retida no cadinho), gramas

$M_s \rightarrow$ massa seca da amostra (livre de extrativos), gramas

Figura 6 – Processo de fervura para obtenção de lignina insolúvel



Fonte: Da Autora (2025)

Holocelulose

O teor de holocelulose é obtido seguindo-se o procedimento descrito por Browning (1963), no qual 2 g (com precisão de 0,1 mg) do material previamente seco a 105°C foi colocado em um Erlenmeyer de 125 mL, juntamente com 55 mL de água, 2 mL de uma solução de clorito de sódio 30% (m/v) – Sigma Aldrich® e 2 mL de uma solução de ácido acético glacial – Êxodo Científica® (1:5, v/v). O Erlenmeyer foi tampado com um cadinho poroso e o conjunto colocado em um banho termostatzado, a $70 \pm 5^\circ\text{C}$. Foi repetida a adição de solução de ácido acético e clorito de sódio a cada 45 minutos.

Figura 7 – Banho termostatzado e biomassa final obtida do filtrado para disposição em estufa.



Fonte: Da autora (2025)

Ao final de aproximadamente 4 horas a mistura foi resfriada lentamente e filtrada em cadinho de vidro com placa porosa e polpa de celulose previamente tarado. A holocelulose (resíduo sólido) resultante foi lavada exaustivamente com três porções de metanol – Êxodo Científica® e água destilada fria utilizando a bomba a vácuo, posteriormente, foi seca em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até massa constante equação 4:

$$\text{Holocelulose (\%)} = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

M_f = Massa de holocelulose (retida no cadinho de porosidade)

M_i = Massa inicial da madeira livre de extrativos

Cinzas

Para a quantificação das cinzas foi realizada conforme a norma NBR 13999 (ABNT, 2003). A amostra (aproximadamente 2 g) foi colocada em cadinhos previamente calcinados sendo estes transferidos para um forno mufla aquecido à taxa de 1,67°C/min até atingir a temperatura de 525°C por 3 horas.

Figura 8 – Processo de obtenção do teor de cinzas



Fonte: Da autora (2025)

O teor de cinzas é determinado como a relação entre a massa incinerada e a massa inicial do material (massa seca total) de acordo com a equação 5 abaixo:

$$Tc = \frac{M_c}{M_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Tc = Teor de cinzas (%)

Mc = Massa de cinzas (g)

Mi = Massa inicial (g)

4.2 Análise Termogravimétrica das biomassas

A análise termogravimétrica para comparação do comportamento das biomassas foi realizada em equipamento Shimadzu - DTG-60AH, sob fluxo de N₂ a 50,0 mL/min com taxa de aquecimento de 10 °C/min entre 25 °C a 800 °C, no Centro de Análise e Prospecção Química – CAPQ, da Universidade Federal de Lavras.

4.3 Procedimentos de preparação do biocarvão

O material foi triturado utilizando o moinho do tipo Star FT50 – Fortnix (UEPAM/UFLA) mostrado na Figura 9 para redução de biomassas com granulometria maiores que 2mm e depositado em estufa de secagem para remoção de umidade.

Figura 9 - Pré processamento – moinho e biomassa.



Fonte: Da autora, 2025

O agente ativador KOH (ACS® Química) em escamas foi adquirido comercialmente. A biomassa foi pesada em balança (20,00 gramas) e disposta em solução de KOH (20,00 g) com água deionizada (400 mL) em agitador magnético pelo tempo de 60 minutos. A proporção química 1:1 foi obtida por trabalho anterior (Y. Ji et al. 2022) e é considerada como moderada. Foi observada uma mudança na coloração das biomassas após a ativação (Figuras 10 e 11) que pode estar relacionada a reação da lignina em meio alcalino.

Figura 10 – Ativação química

a) b) c)

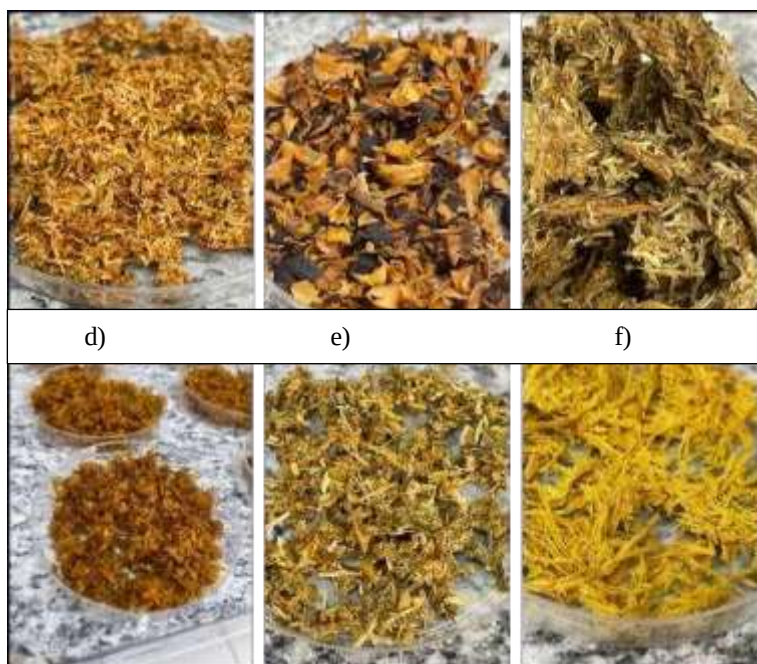


Legenda: a) KOH em escamas; b) e c) biomassas no agitador magnético.

Fonte: Da autora (2025)

Figura 11 – Biomassas ativadas secas

a) b) c)



Legenda: – a) casca de arroz, b) casca de café, c) palha de trigo, d) palha de soja, e) palha de feijão e f) palha de milho

Fonte: Da autora (2025)

O processo de pirólise lenta foi realizado em forno MUFLA em dois patamares: I – de 0 °C a 250 °C, por 60 min e II – de 250 °C a 500 °C, com tempo de residência também de 60 minutos para cada patamar, com rampa de aquecimento fixada em 10 °C/min. A Figura 12 mostra a montagem do reator de pirólise. No primeiro quadro a biomassa foi dividida em dois cadinhos e pesada (segundo quadro), no terceiro quadro temos o encapsulamento do cadinho em papel alumínio para minimização da presença de oxigênio, e por fim após a pirólise

realizada no forno mufla, um dos cadinhos com o biocarvão.

Figuras 12 – Processo de pirólise das biomassas



Fonte: Da autora (2025)

Rendimento

O cálculo do rendimento foi determinado pela razão do biocarvão pela massa impregnada seca após ativação multiplicado por 100 conforme a equação 6:

$$R(\%) = \frac{\text{massa de biochar}}{\text{massa seca impregnada}} \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

R (%): rendimento final percentual obtido.

4.4 Análise termogravimétrica dos biocarvões

O comportamento e a estabilidade térmica dos biocarvões foram investigados por TG e DTA em um analisador Shimadzu – DTG 60 H. Com varreduras realizadas entre as temperaturas de 25 °C a 800 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min sob atmosfera de N₂ e fluxo de 50,00 mL/min.

4.5 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com Transformada de Fourier com reflexão atenuada – FTIR - ATR

Foram obtidos 64 scans por meio do analisador Perkim Elmer IR Spectrum ASCII 4.0 com resolução de 2 cm⁻¹ na faixa espectral de 4000 a 400 cm⁻¹.

4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

As amostras foram dispostas em stubs de alumínio cobertos por fita de carbono seguido de realizado banho de carbono para obtenção de características químicas superficiais por meio do EDS (JEOL 7000F) acoplado ao Microscópio Eletrônico de Varredura- LEO EVO 40 XVP com sistema de microanálise de raios X (XFlash 6160-Bruker) no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME).

4.7 Definição da área superficial e porosidade

Para determinação das características da estrutura porosa do biocarvão, foi utilizado um medidor de área superficial, volume e distribuição de poros Micromeritics modelo ASAP 2020. As amostras foram inicialmente submetidas ao processo de degaseificação à vácuo a 100 °C por 24 horas e em seguida encaminhado para adsorção de N₂ a 77 Kelvin (K). A área superficial foi calculada por meio da equação proposta por Brunauer, Emmett e Teller (BET):

$$\frac{1}{X[(P_0/P)-1]} = \frac{1}{X_m C} + \frac{C-1}{X_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

Onde:

X e X_m é quantidade de gás adsorvida em superfície sólida para formar monocamada dada uma pressão relativa;

C é um parâmetro relacionado ao calor de adsorção.

4.8 Adsorção

A análise termogravimétrica para o processo de adsorção foi obtido por meio do analisador STA 6000 da Perkin Elmer® aquecendo-se sob atmosfera de nitrogênio de 20 °C a 150 °C a 10°C/min por 1 hora e depois resfriado a mesma rampa e temperatura até 20 °C por 20 minutos e posteriormente por 1 hora com troca de gás por dióxido de carbono ao fluxo de 50,0 mL/min. A diferença de massa foi obtida conforme a equação 8:

$$Ads (\%) = \frac{massa\ amostra+CO_2 - massa\ inicial}{massa\ inicial} \quad (Eq. 8)$$

Onde:

Ads (%): percentual de CO₂ adsorvido pela massa do adsorvente

4.9 Cinética

A cinética de adsorção de CO₂ também é um importante aspecto para determinar a eficiência do adsorvente. Ela permite identificar o mecanismo de adsorção e as possíveis etapas de controle das taxas de adsorção, como reação química, controle de difusão e processos de transporte de massa (Bulut; Özacar; Şengil, 2008). Os modelos cinéticos utilizados foram a equação pseudoprimeira ordem, pseudo-segunda ordem, e o modelo de Elovich.

A equação do modelo de pseudoprimeira ordem é expressa como (De Castro et al., 2022):

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (\text{Eq.9})$$

onde q_e (mg g⁻¹) e q_t (mg g⁻¹) são as quantidades de massa de CO₂ adsorvida por massa de biocarvão no tempo t , respectivamente, k_1 (min⁻¹) é a constante de taxa de adsorção desse modelo. As constantes q_e e k_1 podem ser obtidas a partir da interceptação e inclinação da reta no gráfico de $\ln(q_e - q_t)$ versus t .

O modelo de pseudo-segunda ordem é expresso pela relação (DE CASTRO et al., 2022):

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (\text{Eq.10})$$

em que as constantes q_e e k_2 podem ser obtidas pela inclinação e interceptação da reta $1/q_t$ x t .

O modelo de Elovich assume que as superfícies sólidas reais são energeticamente heterogêneas e que nem dessorção nem interações entre as espécies adsorvidas podem afetar substancialmente a cinética de adsorção em baixa cobertura de superfície. O efeito crucial da heterogeneidade de energia na superfície em equilíbrio de adsorção nos sistemas de gás / sólido (Da Silva et al. 2018, Rudzinsk et al. 1992). Ele pode ser expresso pela equação (Pandiarajan et al., 2018):

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t) \quad (\text{Eq. 11})$$

onde α (mg g⁻¹ min⁻¹) é a taxa de sorção inicial e β (g mg⁻¹) constitui a extensão da cobertura superficial e energia de ativação no modo de interação entre adsorvato e adsorvente.

4.10 Análise de dados

Os resultados apresentados no presente estudo foram determinados empregando ferramentas ferramenta solver do Excel e Origin Pro 2024b e software R Studio®.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das biomassas

Os valores encontrados de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Teores em (%) obtidos por análise química.

Biomassa	Total de extrativos	Lignina insolúvel	Cinzas	Holocelulose
Casca de arroz	6,74±0,22	19,12±0,12	15,98±0,03	63,16
Casca de Café	15,43±0,41	23,12±0,42	7,94±0,18	55,51
Palha de trigo	3,94±0,18	24,09±0,06	2,29±0,01	70,27
Palha de Soja	5,73±0,71	23,23±0,21	6,3±0,01	52,27
Palha de feijão	3,92±0,66	25,14±0,84	4,1±0,03	66,84
Palha de milho	9,45±0,58	23,97±0,09	1,19±0,03	65,39

Fonte: Da autora (2025)

Extrativos

Os teores de extrativos, determinados conforme a NBR 14853 (ABNT, 2010), variaram de 2,94% para palha de trigo a 15,43% para casca de café. A casca de café e a palha de milho apresentaram os maiores valores, 9,45% e 15,43%, respectivamente, indicando maior presença de compostos solúveis em solventes orgânicos ou água, como resinas, taninos e óleos essenciais. Os valores da palha de soja estão de acordo com os encontrados por Tapia – Blácido et al. (2017), Cabrera et al. (2015), Wan et al. (2011), de 5 a 11%.

Segundo Rowell et al. (2005), teores de extrativos elevados podem contribuir para maior emissão de compostos voláteis durante a pirólise, mas tendem a reduzir o rendimento em biocarvão devido à volatilização antecipada desses componentes.

Lignina

A lignina é um dos principais constituintes das biomassas lignocelulósicas junto a celulose e hemicelulose. Por ser um polímero natural altamente aromático e termoestável, está associada a maiores rendimentos de carbono fixo no biocarvão, bem como à estabilidade térmica do material pirolisado (Brewer et al., 2009).

A análise de lignina, realizada conforme a NBR 7989 (ABNT, 2010), apontou maior teor na palha de feijão (25,14%), que é próximo ao valor encontrado por Dionízio (2017), de 21,74%. Materiais ricos em lignina apresentam maior resistência à decomposição térmica em relação a outros componentes (Brito e Barrichelo, 1978). Em relação a produção de biocarvões, diversos autores trazem apenas valores referentes a hemicelulose, celulose e lignina na avaliação do teor de carbono fixo sem presença de cinzas e que determinam, no produto final, a presença de carbono (Binnal et al., 2022; Tsai; Lee; Chang, 2007; Weber; Quicker, 2018).

Biomassas com alto teor de lignina são, portanto, preferenciais para aplicações que demandam biocarvões com elevada recalcitrância, ou seja, muito resistentes a degradação, altas temperaturas, por exemplo, e potencial para sequestro de carbono.

Teor de cinzas

O teor de cinzas variou entre as amostras, com destaque para a casca de arroz (15,98%), próximo a valores encontrados por Binnal et al. (2022) (15,14%), Brand et al. (2017) (14,23%) e Khandanlou et al. (2016) (13,9%). Esse valor elevado destaca a elevada carga mineral da casca de arroz, notadamente em sílica (SANTOS et al., 2016), seguido pela casca de café (7,94%). Em contrapartida, palha de milho (1,19%) e palha de trigo (2,29%) apresentaram os menores teores. Altos teores de cinzas podem afetar a porosidade do biocarvão, dificultar acessibilidade superficial no processo de adsorção e causar fusão de material inorgânico durante a pirólise, além de impactar a qualidade térmica do processo (Lehmann; Joseph, 2015).

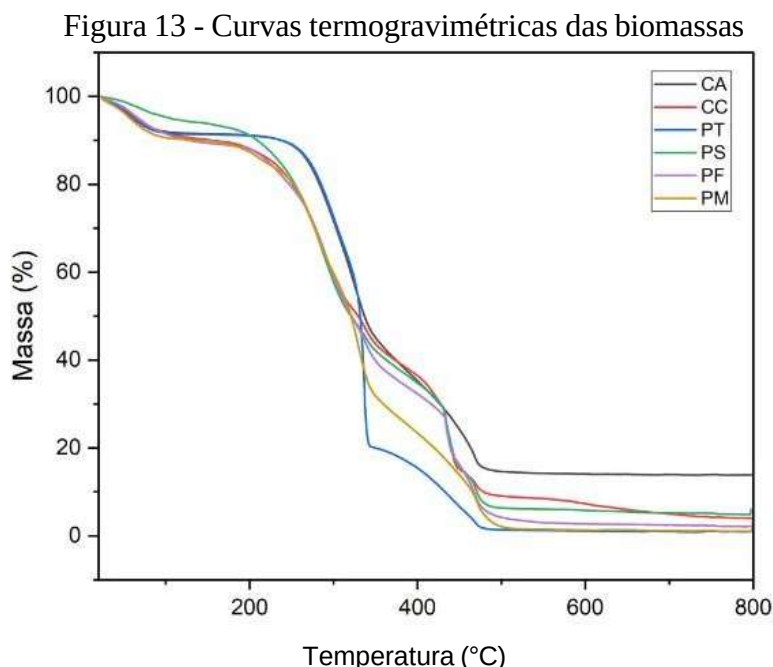
Holocelulose

Os teores de holocelulose, determinados pelo método de Browning (1963), foram mais elevados nas palhas de trigo (70,27%), feijão (66,84%) e milho (65,39%). O valor encontrado para palha de trigo está de acordo com estudos de Ziaei-Rad et al. 2023; Saini e Tewari, 2015,

entre 59-70%. A holocelulose, composta por celulose e hemicelulose, representa a fração mais reativa da biomassa sob aquecimento, sendo responsável por significativa geração de gases e líquidos durante a pirólise (Bridgwater, 2012). Biomassas com alto teor de holocelulose tendem a apresentar menores rendimentos de biocarvão e maior geração de bio-óleo e gases combustíveis, como as palhas, pois, apresentam geralmente maior teor de voláteis que são removidos nos primeiros estágios de pirólise (Vaughn et al., 2013).

Análise Termogravimétrica das biomassas

Os comportamentos térmicos das 6 biomassas puras estão representados na Figura 13.



Fonte: Da autora (2025), CA – Casca de Arroz, CC – Casca de Café, PT – Palha de Trigo, PS – Palha de Soja, PF – Palha de Feijão e PM – Palha de Milho

As biomassas iniciam sua primeira etapa de degradação entre 25-150°C, que está associada à evaporação de umidade e elementos voláteis (Mohan et al., 2014; Lu et al., 2022). A liberação desses voláteis inicia o processo de desobstrução dos primeiros poros na estrutura da biomassa.

Observou-se um maior intervalo de degradação entre as temperaturas de 200 °C e 400 °C, com perda significativa de massa atribuída a decomposição da hemicelulose (200-280°C), que decompõe devido ao seu caráter fortemente amorfo, sendo mais instável termicamente que a celulose e a lignina. A celulose apresenta estrutura cristalina e altamente ordenada, unida por fortes ligações de hidrogênio, o que lhe confere uma maior estabilidade térmica em comparação

a hemicelulose. Conforme mencionado no tópico anterior, as palhas tendem a apresentar maior teor de holocelulose, ou seja, voláteis, o que explica a inclinação acentuada nas curvas de TG. De acordo com Lima et al (2019), nessa fase ocorrem reações químicas complexas, fazendo com que a curva decresça drasticamente.

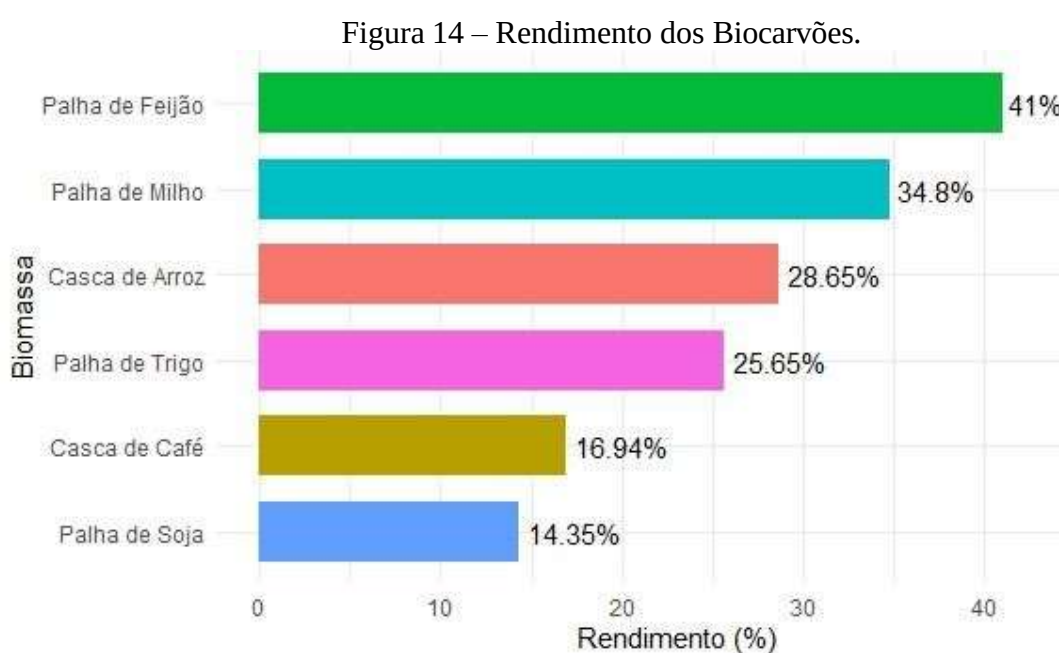
A lignina, devido à sua estrutura altamente polimerizada e aromática, se decompõe termicamente numa faixa de temperatura maior e mais ampla (350 – 600 °C ou mais), apresentando comportamento mais estável com taxa de decomposição mais lenta e constante.

A porção residual e estável observada entre 650 °C e 900 °C representa resíduos inorgânicos como cinzas. A curva da casca de arroz (CA), por exemplo, alcança estabilidade devido ao alto teor de sílica, enquanto as palhas tendem a valores inferiores indicando menor teor inorgânico (Rodrigues et al., 2023). Os mecanismos de degradação declarados acima têm importante significado orientador para otimizar as condições de pirólise necessárias para o desenvolvimento dos poros.

5.2 Caracterização dos biocarvões

Rendimento

Na Figura 14 é apresentado um percentual de rendimento de biocarvão derivado de respectiva biomassa ativada:



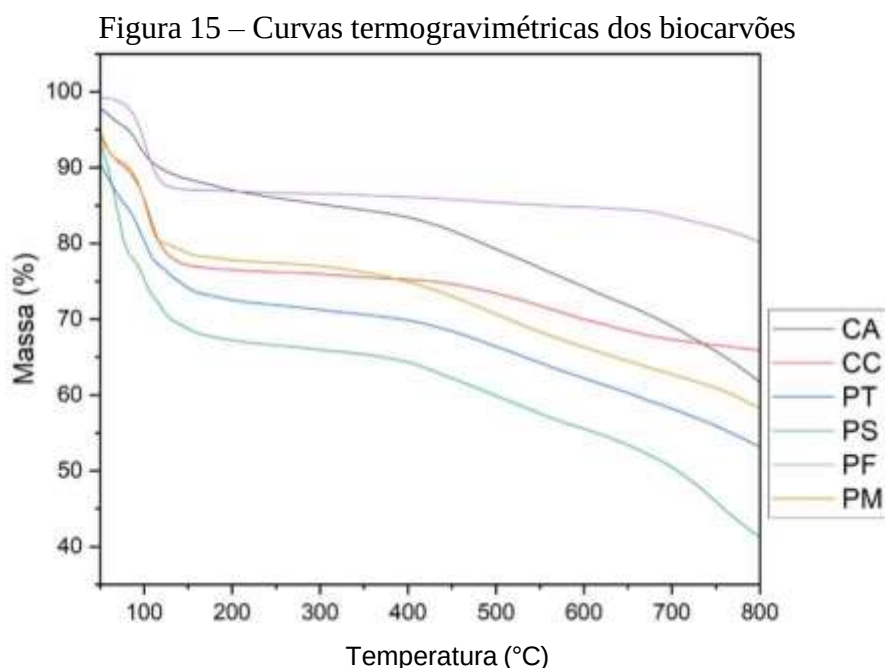
Fonte: Da autora, 2025

Esses resultados podem ser explicados de acordo com a composição da biomassa. Mesmo a holocelulose, que contribui para volatilização, sendo maior nas palhas, outros componentes como extrativos, cinzas e lignina podem corroborar com desempenho em relação ao rendimento do biocarvão. Sugere-se que a lignina contribuiu para maior rendimento do biocarvão. O maior rendimento é atribuído ao biocarvão derivado da palha do feijão com um teor maior de lignina (25,14%) em relação as demais biomassas.

As cascas, por sua vez, apesar de apresentarem resultados moderados de teor de holocelulose, resultaram em valores inferiores de rendimento. Altos teores de extrativos e cinzas podem ter influência direta nesse resultado. Pode-se concluir que os tipos de matéria prima desempenham um efeito significativo nas propriedades físico químicas do biocarvão (Suliman et al., 2016; Shi et al., 2018). Além disso, o biocarvão quimicamente ativado geralmente possui densidade de massa e rendimento comparativamente baixos (Leng et al. 2021).

Análise Termogravimétrica dos biocarvões

O comportamento termogravimétrico dos biocarvões estão representados na Figura 15.



Fonte: Da autora (2025), CA – Casca de Arroz, CC – Casca de Café, PT – Palha de Trigo, PS – Palha de Soja, PF – Palha de Feijão e PM – Palha de Milho

A primeira etapa de perda de massa até 120 °C apresenta eliminação de umidade devido o material não ter sido pré disposto a estufa anteriormente a análise. A segunda etapa, entre 120–250 °C, está relacionada à liberação de compostos orgânicos voláteis, oxigênio superficial e possíveis resíduos de compostos instáveis resultantes da ativação química, assim como decomposição da hemicelulose e posteriormente da celulose não degradadas durante o processo de pirólise (Li et al., 2021, Ding et al. 2014).

A terceira etapa de perda de massa, mais significativa, entre 250–600 °C, corresponde à oxidação de carbono refratário e recalcitrante com lignina residual e carbono alifático restante da pirólise (especialmente após 500°C, que foi a temperatura do processo pirolítico), o que leva à liberação de dióxido de carbono (CO₂), matéria volátil, aromáticos substituídos e estruturas aromáticas poli condensadas conferindo determinada estabilidade.

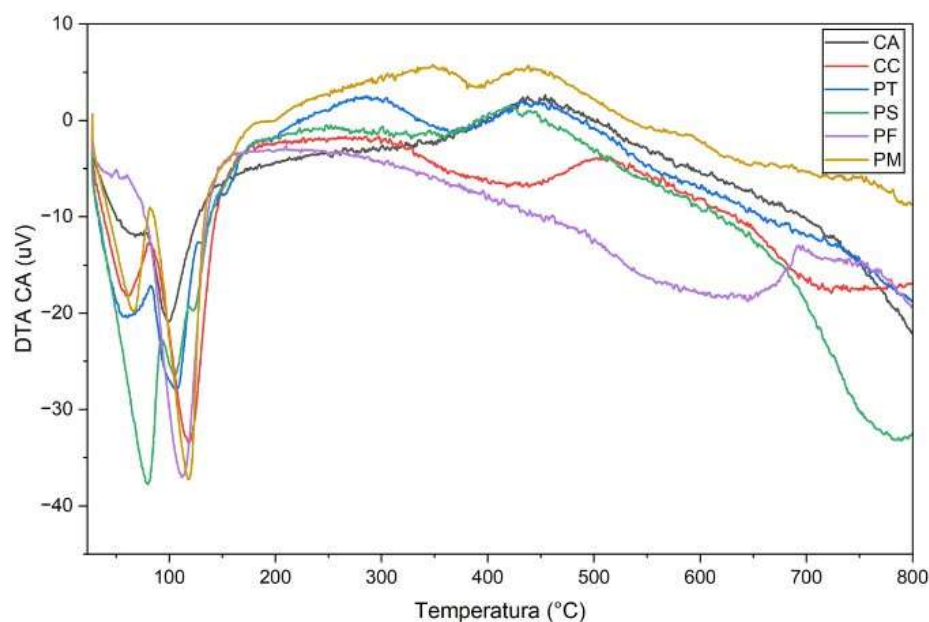
A quarta etapa de perda de massa, de 600–800 °C, pode ser caracterizada por oxidação adicional ou craqueamento térmico de carbonatos fixos, resultando em perda de massa e liberação de vários compostos orgânicos (Soli e Panwar, 2025, Yang et al., 2020).

O biocarvão PF apresentou a maior estabilidade térmica. Este comportamento está alinhado com a literatura, que aponta que resíduos agrícolas de alta proporção de holocelulose (hemicelulose e celulose) apresentam maiores perdas térmicas após ativação (Mohan et al., 2014; Yang et al., 2020).

Comparativamente, os biocarvões CA e CC demonstraram perfis mais equilibrados, indicando uma boa proporção entre estabilidade térmica e quantidade de grupos funcionais. Os biocarvões PT e PM revelaram perfis muito semelhantes, especialmente na etapa intermediária (250– 600 °C), refletindo a decomposição intensa dos carbonos ativados e formação de porosidades (Li et al., 2021).

Em relação a DTA os picos foram predominantemente exotérmicos, como mostrado na Figura 16:

Figura 16 – Análise Térmica Diferencial



Legenda: CA – Casca de Arroz, CC – Casca de Café, PT – Palha de Trigo, PS – Palha de Soja, PF – Palha de Feijão e PM – Palha de Milho
 Fonte: Da autora (2025)

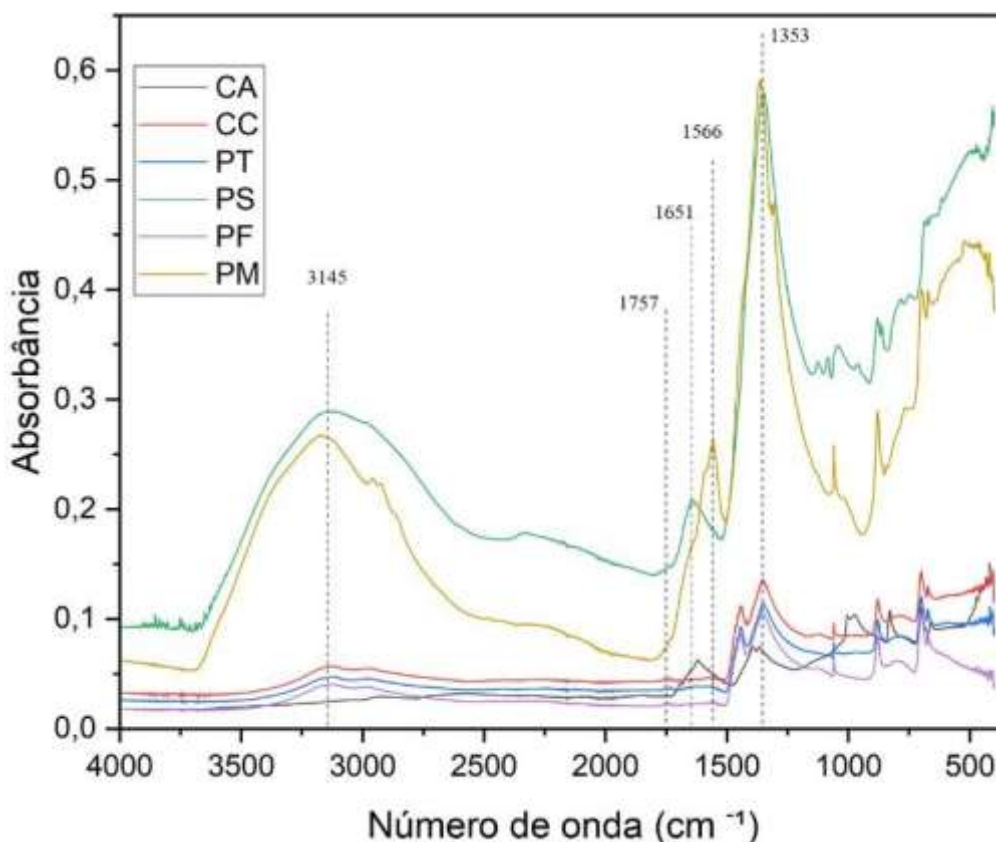
A análise térmica diferencial - DTA permitiu identificar os eventos térmicos que ocorrem durante a degradação dos biocarvões, sendo os picos exotérmicos um indicativo crucial da evolução estrutural e funcional do material carbonizado. A presença de picos bem definidos pode estar associada a formação de carbono fixo aromático que proporciona o biocarvão maior estabilidade térmica.

Nesse ponto o biocarvão PS apresenta um intenso pico exotérmico, seguido pelo CC, o que sugere maior teor de compostos lábeis e reorganização estrutural mais significativa, e esse comportamento pode implicar em relação ao desenvolvimento superficial de microporosidade e criação de sítios ativos. Os PT e CA apresentaram comportamento exotérmico mais moderado e por fim, PF e PM a intensidade exotérmica foi de modo mais prolongado.

Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com Transformada de Fourier com reflexão atenuada – FTIR – ATR

A Figura 17 apresenta os scans obtidos por meio do FTIR-ATR:

Figura 17 - Espectros FTIR-ATR para os biocarvões CA, CC, PT, PS, PF e PM



Legenda: CA – Casca de Arroz, CC – Casca de Café, PT – Palha de Trigo, PS – Palha de Soja, PF – Palha de Feijão e PM – Palha de Milho
 Fonte: Da autora (2025)

A faixa entre $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ corresponde a vibrações de estiramento OH e NH, indicando a presença de grupos hidroxila e indica também a presença de grupos fenólicos, água adsorvida e álcool. Isso implica que os grupos hidroxila superficiais estão disponíveis para formar ligações de hidrogênio com moléculas de adsorbato (Jiang et al. 2024, Deng et al. 2018). As intensidades relativas das bandas em 3000 e 2800 cm^{-1} , associadas à vibração de estiramento assimétrico e simétrico de C–H de carbono sp^3 na biomassa (Park et al., 2019a). Os biocarvões PS e PM apresentam bandas mais proeminentes que os demais.

A banda de absorção a 1651 cm^{-1} é atribuída às vibrações das ligações C=C em alkenos em anéis aromáticos (Harimisa et al. 2023). O pico em torno de 1651 cm^{-1} aparece nos biocarvões CA, PS e PM; a literatura aponta que os picos de alongamento C=C está diretamente associada ao processo de aromatização e grafitação parcial do biocarvão (Tomczyk et al., 2020), e normalmente ocorrem em torno de $1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$, enfatizando sua natureza aromática que também se envolve em interações $\pi\text{--}\pi$ (Jiang et al. 2024, Yang e Jiang, 2014).

Esses grupos podem indicar alta densidade de sítios polares.

Houve uma banda proeminente com maior intensidade em 1353 cm^{-1} ; essa banda, juntamente com a banda em 1651 cm^{-1} , é associada a grupos carboxilados e aromáticos. Sua alta intensidade nas amostras PS e PM, junto com os grupos -OH, sugere uma maior quantidade de compostos orgânicos residuais e menor estabilidade térmica como visto na TG anteriormente.

A presença de grupos carbonila (C=O) e carboxila (bandas em 1757 , 1651 e 1353 cm^{-1}) nas amostras PS e PM, correlaciona-se com a instabilidade térmica observada no TG. A decomposição desses grupos orgânicos residuais contribui para a perda de massa em temperaturas mais elevadas e pode ser a causa dos picos exotérmicos observados nas curvas de DTA acima de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, pois essas moléculas se rearranjam e se oxidam, liberando energia.

As bandas em torno de $1200\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ são devidas ao estiramento simétrico e assimétrico de C–O dos grupos éter da lignina, hemiceluloses e do anel de glicose da celulose (de Castro et al. 2022, Mohammed et al., 2018) sobrepostos a vibrações de estiramento C–N correspondentes a grupos amina ou também a vibrações de dobra O–H de ácidos carboxílicos (Bakara et al. 2024, Harimisa et al. 2023) ou carbamatos. Os pequenos picos podem observados em CC, PT, PF e PM confirmam a presença do carboxilato. A banda em 1067 cm^{-1} indica a presença de silicatos relacionados à composição mineral de Si presente no CA (Premchand et al. 2024, Morales et al., 2021; Wei et al., 2017).

Por fim, as bandas na região de 900 cm^{-1} a 600 cm^{-1} visível em todas as amostras são atribuídas a vibrações de dobra das ligações C–H em anéis aromáticos (Khalil et al. 2022) e também podem representar deformações no plano desses anéis com substituição por N (piridínico ou grafítico). Alguns autores (Sun et al. 2024, Huang et al. 2022) citam que grupos amínicos e amidas têm papel direto na adsorção química, enquanto N piridínico/grafítico estabiliza a estrutura do carbono.

A presença desses grupos e grupos oxigenados podem ajudar explicar o melhor desempenho de adsorção por PS mesmo apresentando menor rendimento, como será discutido mais adiante.

Caracterização morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS

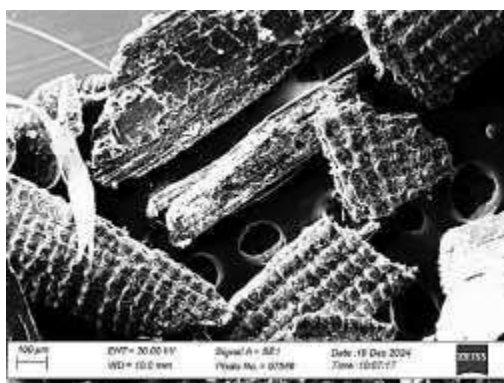
Micrografias obtidas pelo MEV em diferentes magnificações das biomassas antes (esquerda) e o biocarvão final (direita) são mostradas na Figura 18.

As biomassas de cascas e palhas, em natura, apresentam estrutura heterogênea, com características fibrosas e com rugosidades. Já o biocarvão CA apresentou distribuição irregular de macroporos, provavelmente devido a ativação com o KOH. Shen, (2017b) em um estudo com casca de arroz ativado com KOH denominou a estrutura externa ondulada final de “feixe vascular” com nano-sílica na superfície, com o aumento da temperatura e do tempo de pirólise a estrutura rugosa ficou cada vez mais evidente (Fu et al. 2019) com a formação de macroporos. O CC revelou uma estrutura parecida com “esponja” e os poros indicaram um alargamento no diâmetro à medida que a estrutura se desenvolvia em redes porosas ásperas em forma de favo de mel (Yeung et al. 2014 citado por Lim et al. 2021).

Nas palhas pode se observar que microfibrilas de celulose se encontram dispostas em uma estrutura compacta com orientação em paralelo (Panda e Jain, 2025, Martelli-Tosi et al. 2017) e pequenas microfissuras. A região superficial exibe textura áspera e rugosa com presença de alguns detritos ou descamações (Niglio et al., 2020). A adição de KOH ao biocarvão possivelmente potencializou a formação de pequenos buracos profundos na superfície do carvão ativado (Hoang et al. 2024).

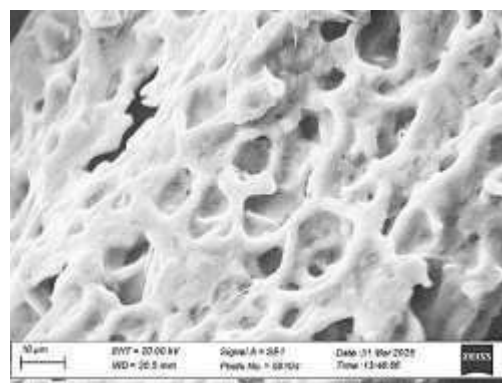
Os biocarvões apresentaram fusão dos materiais em uma textura porosa em pó ou micro grânulos.

Figura 18 – Biomassas em natura a), c), i), g) e k) e do lado esquerdo b), d), f), h), j) e l) são os biocarvões obtidos pelas biomassas com ativação química.



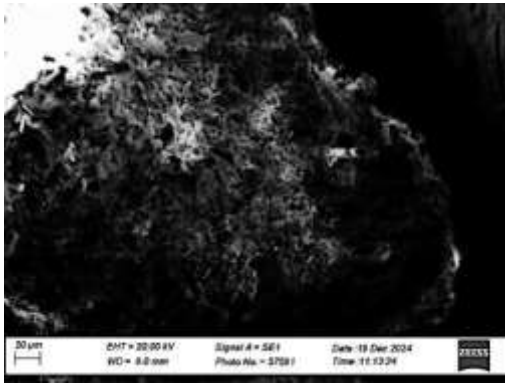
a)

Casca de arroz

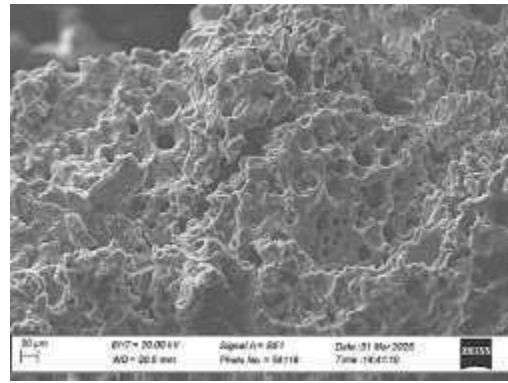


b)

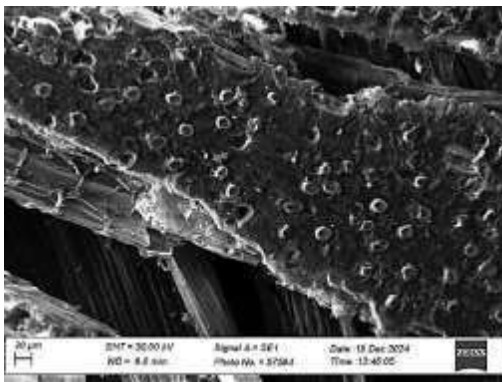
Biocarvão CA



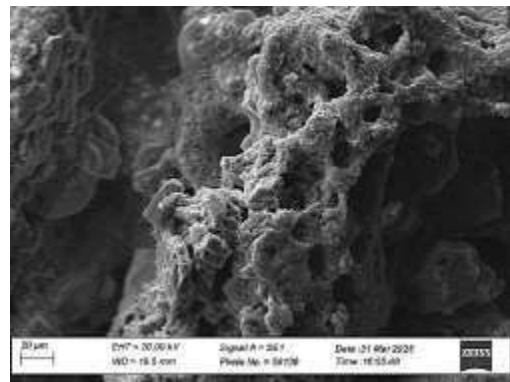
c)
Casca de café



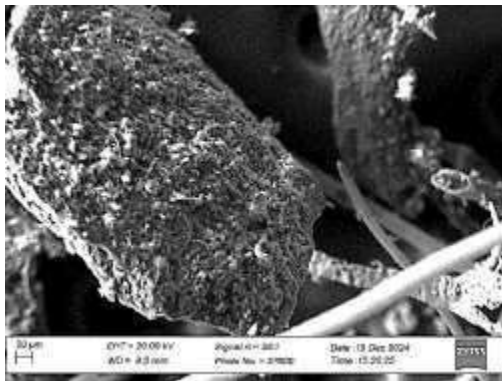
d)
Biocarvão CC



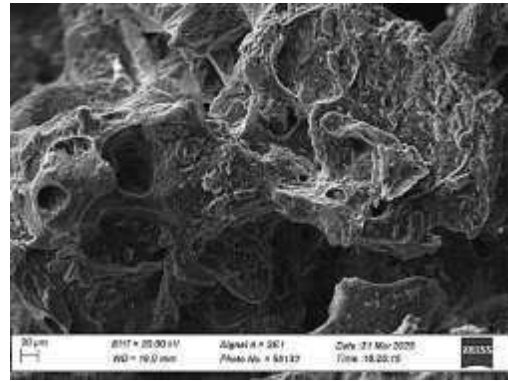
e)
Palha de trigo



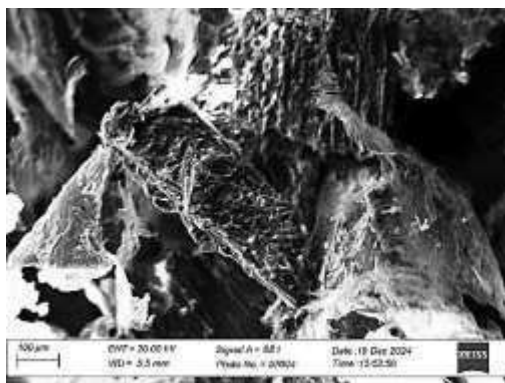
f)
Biocarvão PT



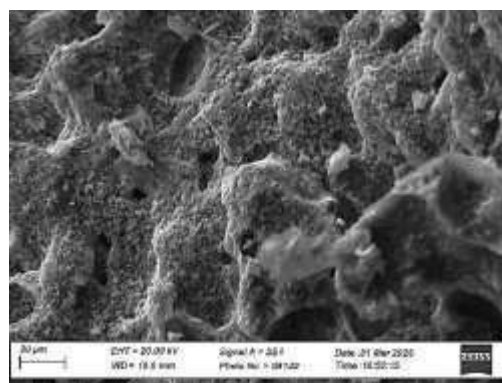
g)
Palha de Soja



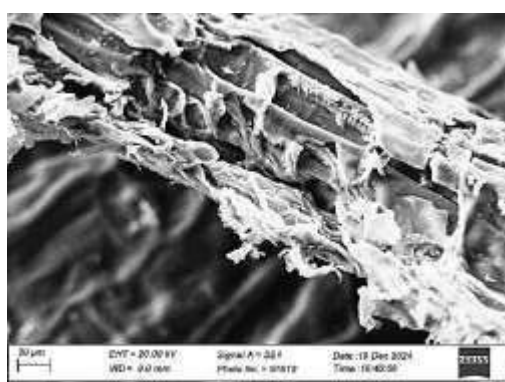
h)
Biocarvão PS



i)
Palha de Feijão



j)
Biocarvão PF



k)
Palha de Milho



l)
Biocarvão PM

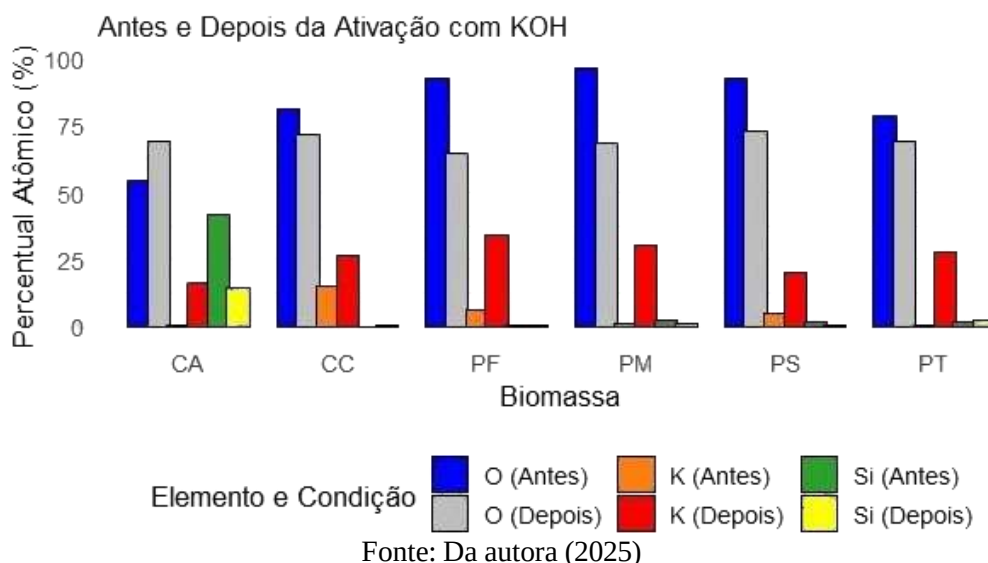
Todos os biocarvões apresentaram uma rede extremamente complexa de poros, canais e superfícies fibrosas conforme relatado pela literatura (Laiquan et al. 2023, Dekhoda, West e Ellis, 2010). Nota-se pequenas estruturas aderidas a superfície, provavelmente relacionadas a resíduos da ativação com hidróxido de potássio. Esses cristais podem influenciar tanto a funcionalização da superfície e consequente comportamento adsorptivo, esses minerais residuais alcalinos aumentam a basicidade superficial do biocarvão podendo favorecer a adsorção Zhang et al. (2012).

A análise EDS acoplada ao MEV permite a obtenção composicional das biomassas e dos biocarvões (Figura 19). As cascas e palhas também apresentam diferentes composições químicas, principalmente oxigênio, sílica e potássio que influenciam o comportamento térmico e consequentemente o desempenho do biocarvão.

Esta análise foi conduzida de forma semiquantitativa, como é típico do ensaio de EDS, com capacidade de detecção limitada, o que inviabiliza a identificação e quantificação de elementos como nitrogênio, carbono e a determinação precisa das concentrações dos demais constituintes, porém nos permite um vislumbre da presença dos mesmos nos materiais

analisados.

Figura 19 – Comparação dos teores atômicos antes e depois por EDS



Apesar das limitações, observa-se uma redução considerável do teor de oxigênio nos biocarvões, exceto para casca de arroz. Devido ao alto teor de cinzas a casca de arroz pode conter de 20 – 25 % de sílica, o que correspondeu ao estiramento Si-O-Si na banda 1067 cm^{-1} , indicando a presença de silicatos relacionados à composição mineral de Si presente na casca de arroz (Premchand et al. 2024, Morales et al., 2021; Wei et al., 2017). Outro fator é a interação da sílica com KOH podendo ter ocorrido a formação de silicato de potássio (K_2SiO_3).

Em relação ao potássio, antes do processo de ativação os maiores teores obtidos foram para casca de café, palha de feijão e palha de soja. Para o biocarvão final a presença do potássio é devida a sais inorgânicos restantes ou como parte da estrutura do carbono como sais estáveis, por exemplo, K_2CO_3 , vindos da ativação, que permaneceram incrustado ao biocarvão mesmo após a pirólise. (Chen et al., 2020, 2021b). Os valores encontrados para PS estão de acordo com estudo de Hoang et al. 2024.

Área superficial e porosidade

As propriedades que compõem as características texturais dos biocarvões também são fatores importantes de suas capacidades de adsorção, com uma maior área de superfície específica (SSA) e volume de poros favorecendo a adsorção (Ahmed et al., 2018). Na Tabela 8 são apresentadas SSA, volume de poros e o diâmetro médio dos poros para os diferentes biocarvões.

Tabela 8 - Resultados SSA, VP e diâmetro médio do poro.

Biocarvão	Área Superficial BET (m²/g)	Volume Total de Poros (cm³/g)	Diâmetro médio do poro (nm)
Casca de Arroz	30,18	0,020	2,59
Casca de Café	44,24	0,021	1,94
Palha de Trigo	44,70	0,024	2,11
Palha de Soja	0,017	-	-
Palha de Feijão	-	-	-
Palha de Milho	0,020	0,005	987,36

Fonte: Da autora (2025)

Os biocarvões CC (44,24 m²/g), PT (44,70 m²/g) e CA (30,18 m²/g) apresentaram os maiores valores de área superficial, estando dentro da faixa típica para biocarvões ativados quimicamente a temperaturas moderadas (400–600 °C), como observado em estudos de (Zhang et al. 2022, Leng et al. 2021). Esses materiais também apresentaram baixos volumes totais de poros (0,020–0,024 cm³/g) e os diâmetros médios de poros entre 1,94 e 2,59 nm, compatíveis com a presença dominante de microporos e mesoporos iniciais.

Por outro lado, o biocarvão PS apresentou uma área superficial extremamente baixa (0,017 m²/g) e a ausência de dados de volume e diâmetro médio de poros, sugere um colapso estrutural da matriz lignocelulósica durante a pirólise ou bloqueio dos poros por resíduos inorgânicos. O biocarvão PM exibiu um perfil peculiar, com área superficial e volume total de poros baixos (0,020 m²/g) e (0,005 cm³/g), porém um diâmetro médio de poros elevado (987,36 nm) que podem indicar presença de macroporos. E por fim, o biocarvão PF apresentou área superficial abaixo do limite de detecção do equipamento.

Diversos fatores estão relacionados ao desenvolvimento superficial e porosidade que durante o processo de preparação e produção do biocarvão podem influenciar seu resultado, inclusive a atmosfera em que a pirólise é realizada. Kim e Hadigheh (2024) observaram que a área específica do biocarvão derivado de biosólido apresentou uma redução de valor com aumento na presença de ar, o que atribuíram a queima do carvão e pirólise oxidativa com diminuição da carbonização do biocarvão.

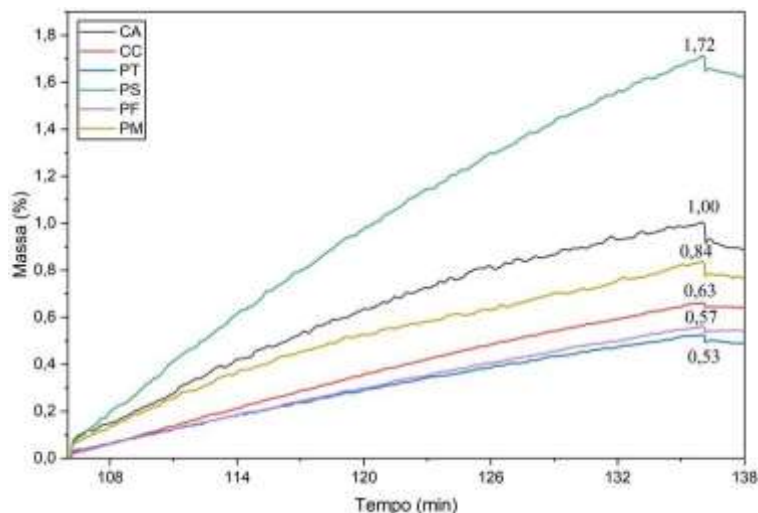
5.3 Desempenho dos biocarvões para adsorção de CO₂

Análise termogravimétrica de adsorção dos biocarvões

A análise termogravimétrica (TG) para adsorção de CO₂ é uma ferramenta crucial para compreender o comportamento e o desempenho de materiais sólidos na captura de gases. Nesse

tipo de ensaio, o material adsorvente — como os biocarvões — é submetido a um fluxo controlado de CO₂ sob condições específicas de temperatura e tempo, enquanto sua massa é continuamente monitorada.. As curvas de TG apresentadas na Figura 20, que mostram o ganho de massa em função do tempo, refletem a quantidade de gás adsorvido:

Figura 20 – Análise TG para adsorção de CO₂



Legenda: CA – Casca de Arroz, CC – Casca de Café, PT – Palha de Trigo, PS – Palha de Soja, PF – Palha de Feijão e PM – Palha de Milho
Fonte: Da autora (2025)

As curvas de ganho de massa com o tempo mostram que todos os biocarvões foram capazes de adsorver CO₂, com curvas ascendentes dentro das condições pré estabelecidas pela análise cinética de adsorção. O princípio básico consiste em medir a variação de massa do sólido em função do tempo: o ganho de massa observado nas curvas de TG, como ilustrado na Figura 20, está diretamente relacionado à quantidade de CO₂ adsorvida na superfície e nos poros do material. Essas variações refletem as diferenças na composição elementar da biomassa utilizada neste estudo, estrutura porosa e tipos de grupos funcionais superficiais gerados durante a pirólise e ativação. Assim, a análise TG fornece uma visão quantitativa e comparativa da capacidade real de captura de CO₂.

Destaque proeminente foi observado para PS, que exibiu o melhor desempenho (1,72%) de massa adsorvida, com tendência de crescimento exponencial se o tempo de ensaio programado não houvesse retornado a atmosfera de N₂. Esse comportamento foi seguido por CA (1,00 %) e PM (0,84%), diferente dos demais biocarvões, CC (0,63%), PF (0,57%) e PT (0,53 %), que apresentaram valores próximos com tendência a saturação conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Capacidades de adsorção de CO₂.

Biocarvão	Massa adsorvida (%)	mg CO₂/g biocarvão	mmol CO₂/g biocarvão
PS	1,72	17,2	0,39
CA	1,00	10,0	0,23
PM	0,84	8,4	0,19
CC	0,63	6,3	0,14
PF	0,57	5,7	0,13
PT	0,53	5,3	0,12

Fonte: Da autora (2025)

É interessante observar que PS e CA exibiram as menores áreas superficiais (0,017 m²/g e 30,18 m²/g). Em relação ao volume de poros, esses biocarvões também estão entre os menores valores, não sendo detectado para PS, e 0,020 cm³/g para CA. Os resultados para área superficial BET e volume total de poros para biocarvão de casca de arroz são semelhantes aos encontrados por Basta et al. (2020).

Na análise química, dentre as biomassas, a palha de soja apresentou o menor teor de holocelulose, porém dentro dos valores encontrados na literatura (CAO et al. 2022; Lenhani et al. 2018, Neto et al. 2013).

Quando a presença de grupos funcionalizados, o EDS apontou alto teor de oxigênio nas biomassas anterior ao processo de ativação e pirólise, reduzindo significativamente após a pirólise, exceto para o biocarvão CA que aumentou. Supõe-se que esse aumento esteja relacionado a formação do silicato de potássio que aumenta a disponibilidade de sítios ativos e O na superfície do biocarvão como visto pela análise FTIR, além da incorporação pelo KOH a matriz da biomassa.

A presença de átomos de oxigênio pode contribuir para o aumento da capacidade de adsorção, pois, a inserção desses átomos em grupos superficiais proporciona uma maior interação eletrostática a favor da adsorção de CO₂ (Ma et al. 2020).

Nessa mesma linha, o desempenho do biocarvão PS pode ser devido a funcionalização química que pode superar limitações texturais (Sun et al. 2024). Desse modo levanta-se a hipótese de que o melhor desempenho adsorativo esteja relacionado a sua composição química inicial com a presença de grupos de nitrogênio além de oxigênio.

Comportamento semelhante foi relatado por CAO et al. (2022) em um estudo com sete biomassas entre palhas e madeiras pirolisadas a 600 °C por 3 horas, os autores obtiveram para a palha de soja uma área superficial de 81,48 (m²/g), a segunda menor do estudo, porém alcançaram a maior adsorção de 41,19 mg/g dentre as palhas. Apesar de não ter realizado o

procedimento de ativação química, os autores atribuíram o resultado a maior basicidade superficial (0,58 mmol/g) devido a presença de grupos funcionais superficiais com teor significativo de nitrogênio. Esse resultado também está de acordo com os observados por outros autores na literatura (Jalilian et al. 2024, Solís et al. 2023) que atribuem o desempenho adsorptivo por biocarvões a presença de grupos funcionais superficiais contendo nitrogênio e basicidade promovida pela alcalinidade devido o CO₂, gás ácido de Lewis fraco, apresentar maior afinidade de ligação ao adsorvente básico (Igalavithana et al. 2020).

Sethupathi et al. (2017) utilizaram quatro matérias-primas, para comparar a capacidade de adsorção: restos de soja, folhas de perilla em pó pirolizadas a 700 °C, e carvalho japonês e carvalho coreano de 400 e 500 °C. Os biocarvões em pó apresentaram melhor captura, sendo a folha de perilla com 2,31 mmol/g e os restos de soja 0,707 mmol/g, versus 0,60 e 0,38 mmol/g dos demais. Os autores relacionaram e creditaram os resultados aos teores de nitrogênio dos biocarvões.

Esse fator pode ser correlacionado a forte capacidade de fixação de N da planta em vida e que permanecem em sua estrutura quando biomassa seca juntamente com outros elementos como K, Si, além da lignina e holocelulose, já favorecendo a formação de grupos básicos (Wang et al. 2020, Tan et al. 2015). Ao ativar uma biomassa que já tende a apresentar nitrogênio em sua composição com KOH pode potencializar os grupos superficiais de nitrogênio como os grupos amínicos que podem reagir com CO₂ por diferentes rotas como aminas primárias e secundárias (–NH₂, –NH–) formando carbamatos por meio do mecanismo zwitterion ou aminas terciárias (–NR₃) que reagem com o CO₂ (Jung et al. 2019, Ko et al. 2011). Essas interações químicas são observadas neste estudo e podem ser corroboradas por meio do FTIR com estiramentos de COO[–] (1300–1500 cm^{–1}), vibrações de N–H (3500–3200 cm^{–1}, grupos protonados) e bandas de carbamatos (1200–1000 cm^{–1}). Guo et al. (2022) também observaram em seu estudo que os hidrogênios dos grupos hidroxila e carboxila exibiram uma forte eletropositividade, o que poderia levar a formação de ligações de H com os átomos de oxigênio eletronegativos em CO₂ para facilitar a adsorção de CO₂. É possível identificar pelo FTIR na faixa entre 3600-3000 cm^{–1}, correspondente a vibrações de estiramento OH e NH, com destaque para PS e PM.

Essa heterogeneidade superficial química e características envolvendo as diferentes matérias primas pelo processo de ativação e principalmente na temperatura contribuíram para a exibição de diferentes perfis de biocarvão conforme relatado por diversos autores (Zhang et al. 2022, Cao et al. 2022, Leng et al. 2021, Tomczyk et al. 2020, Ma et al. 2020).

Por outro lado, a redução da capacidade adsorptiva dos demais biocarvões pode ser atribuída ao elevado teor de cinzas ou acúmulo de resíduo de sais de KOH, que tendem a bloquear os microporos e, simultaneamente, impedir o acesso do CO₂ aos sítios básicos ativos presentes na superfície do biocarvão (Pan et al. 2024) e a presença de poros internos fechados (Sharma et al. 2004) como para CC, PF e PT.

Cinética

A fim de avaliar os mecanismos de adsorção de CO₂, os dados experimentais foram submetidos aos modelos cinéticos de pseudoprimeira ordem (PPO), pseudosegunda ordem (PSO) e Elovich. Na Tabela 9 estão descritos os parâmetros dos modelos cinéticos, bem como os coeficientes de determinação (R²) e soma dos quadrados dos erros dos biocarvões:

Tabela 10 - Parâmetros dos modelos cinéticos de adsorção ajustados aos dados experimentais de adsorção de CO₂ pelos biocarvões

Biocarvão	Modelo	Parâmetro 1	Parâmetro 2	R ²	Errosq
CA	PPO	qe: 0.94	k1: 0.0013	0.071	0.067
	PSO	qe: 0.32	k2: 0.0098	0.151	0.065
	Elovich	α : 0.15	β : 1.44	0.951	0.003
CC	PPO	qe: 0.91	k1: 0.0011	0.048	0.072
	PSO	qe: 0.27	k2: 0.0105	0.132	0.069
	Elovich	α : 0.11	β : 1.58	0.947	0.004
PT	PPO	qe: 0.83	k1: 0.0012	0.059	0.074
	PSO	qe: 0.24	k2: 0.0108	0.128	0.070
	Elovich	α : 0.10	β : 1.66	0.952	0.004
PS	PPO	qe: 1.71	k1: 0.0009	0.062	0.074
	PSO	qe: 0.55	k2: 0.0082	0.141	0.069
	Elovich	α : 0.22	β : 1.32	0.963	0.003
PF	PPO	qe: 0.73	k1: 0.0014	0.066	0.076
	PSO	qe: 0.20	k2: 0.0110	0.139	0.070
	Elovich	α : 0.09	β : 1.75	0.956	0.004
PM	PPO	qe: 0.81	k1: 0.0013	0.063	0.075
	PSO	qe: 0.23	k2: 0.0099	0.135	0.071
	Elovich	α : 0.11	β : 1.61	0.959	0.003

Legenda: PPO: Pseudoprimeira ordem; PSO: pseudo-segunda ordem; R²: Coeficiente de determinação; ERRSQ: Soma dos quadrados dos erros; no qual qe (mg g⁻¹), k1 (min⁻¹), k2 (g mg⁻¹ min⁻¹), α (mg g⁻¹ min⁻¹), β (g mg⁻¹)

Fonte: Da autora (2025)

O melhor ajuste encontrado para os biocarvões foi o modelo de Elovich no qual a adsorção não ocorre de maneira uniforme em toda a superfície, mas é dominada pela interação

forte e específica entre o CO₂ e os grupos funcionais, como sugerido anteriormente, os grupos de nitrogênio, presentes em diferentes tipos de sítios. Com o aumento da temperatura, a maior energia cinética das moléculas de CO₂ reduz sua permanência nos sítios ativos, favorecendo a dessorção conforme relatado na literatura por Ding and Liu (2020) e Goel et al. (2016).

Essa heterogeneidade, descrita pelo modelo de Elovich, é o que impulsiona a alta capacidade de adsorção e a velocidade inicial superior de PS em comparação com os outros biocarvões. Isso pode corroborar com a hipótese de que a adsorção não depende apenas de um único tipo de sítio, mas de múltiplos sítios com diferentes energias de adsorção. A alta afinidade do CO₂ por grupos funcionais específicos, como os grupos de nitrogênio e oxigênio presentes no biocarvão, é a principal força motriz do processo, e o modelo de Elovich é o mais preciso para descrever essa cinética complexa e altamente eficaz. Desse modo o biocarvão mais eficiente com maior R² e maior eficiência foi o PS. Esses modelos cinéticos auxiliam na projeção de reatores em escalas maiores pois auxiliam a determinar a velocidade que a reação acontece e realizar ajustes para saber o tempo que o gás a ser adsorvido permaneça na coluna. Outro fator é o número de ciclos, quanto mais rápido a adsorção/dessorção, maior será a produtividade no processo de purificação e menor gasto de energia.

6. CONCLUSÃO

O uso de biocarvões de seis tipos de biomassas derivadas de resíduos agrícolas foram avaliadas quanto ao potencial de captura de CO₂. Todas as amostras de biocarvões apresentaram potencial positivo de captura, com destaque para os biocarvões derivados de biomassa de palha de soja e casca de arroz (0,39 e 0,23 mmol/g) respectivamente.

As análises químicas das biomassas apresentaram teores de lignina, cinzas, holocelulose dentro de valores encontrados na literatura. A palha de soja demonstrou menor teor de holocelulose dentre as biomassas, o que pode ter influenciado para o menor rendimento após a ativação química com hidróxido de potássio e tratamento térmico. Porém, mesmo com menor rendimento, PS se mostrou eficiente com maior capacidade de adsorção e cinética relativamente rápida em relação aos demais biocarvões e ainda não atingido seu platô devido o tempo de ensaio limitado a aproximadamente 30 minutos.

Entre os materiais avaliados, os biocarvões derivados da palha de soja (PS) e da casca de arroz (CA) exibiram as menores áreas superficiais. Entretanto, o desempenho adsorptivo relativamente superior desses adsorventes indica que a eficiência do processo não está restrita

apenas ao desenvolvimento estrutural e textural, mas pode estar fortemente associada à presença de grupos funcionais superficiais contendo oxigênio e nitrogênio, os quais favorecem interações específicas com as moléculas de CO₂. Ademais a análise cinética demonstrou que o modelo de Elovich apresentou o melhor ajuste, sugerindo que o mecanismo de adsorção nesses materiais é predominantemente controlado pela elevada heterogeneidade energética de suas superfícies ativas.

A análise dos biocarvões, obtidos a partir de diferentes biomassas de resíduos agrícolas, revelou que as propriedades físico-químicas e térmicas são cruciais para determinar o desempenho na adsorção de dióxido de carbono (CO₂). Desse modo sugere – se para as próximas pesquisas um aumento na temperatura da pirólise de 500°C para 600°C e realização de banho em água deionizada pós pirólise para remoção de resíduos do ativador e possível desobstrução de poros. Recomenda-se a realização de análise elementar (C, H, O, N, S) que devido a limitações não pôde ser realizada neste estudo para comparação entre os elementos antes e após ativação e pirólise.

Importante ressaltar a diversidade de possíveis aplicações para os biocarvões derivado de biomassas que não tiveram bom desempenho na adsorção de CO₂ mas, podem auxiliar na remoção de metais pesados, uso em dispositivos de armazenamento de energia entre outros que exibiram potenciais perfis para tais finalidades, reforçando a versatilidade das biomassas como alternativa mais limpa e sustentável para o meio ambiente e sociedade.

REFERÊNCIAS

- ABAD, A. et al. Carbon dioxide capture by chemical looping combustion. **Fuel Processing Technology**, v. 90, p. 925–932, 2009.
- AGUIAR, N. V. V. et al. Extraction and Characterization of Lignin from Corn Straw (*Zea mays* L.). **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 6, 2020.
- AGNESINI, M. V. **Estudo da neutralização da emissão de gases do efeito estufa na escola de engenharia de Lorena**. Lorena, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Química) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.
- AHMARUZZAMAN, M.; GUPTA, V. K. Rice husk and its ash as low-cost adsorbents in water and wastewater treatment. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 24, p. 13589–13613, 2011.
- AHMED, M. B. et al. Sorption of hydrophobic organic contaminants on functionalized biochar: Protagonist role of π - π electron-donor-acceptor interactions and hydrogen bonds. **Journal of Hazardous Materials**, v. 360, p. 270–278, 2018.
- AHMED, M. B. et al. Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 836-851, 2016.
- ABNT. **NBR 14853:2010**. Madeira – Determinação do teor de extrativos totais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.
- ABNT. **NBR 7989:2010**. Polpa de madeira – Determinação do teor de lignina insolúvel. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.
- ARMESTO, L. et al. Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. **Biomass Bioenergy**, v. 23, p. 171–179, 2002.
- BAKAR, I. U. et al. Investigation of kinetics and thermodynamics of methylene blue dye adsorption using activated carbon derived from bamboo biomass. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 166, p. 112609, 2024.
- BASTA, A. H. et al. Effective treatment for environmental enhancing the performance of undesirable agro-waste in production of carbon nanostructures as adsorbent. **J Appl Polym Sci**, v. 138, p. e50350, 2021.
- BASTA, A. H. et al. Effective treatment for environmental enhancing the performance of undesirable agro-waste in production of carbon nanostructures as adsorbent. **J. Appl. Polym. Sci.**, 2020.
- BEESLEY, L. et al. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 12, p. 3269-3282, 2011.
- BINNAL, P. et al. Upgrading rice husk biochar characteristics through microwave- assisted

phosphoric acid pretreatment followed by co-pyrolysis with LDPE. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 16, p. 1254–1273, 2022.

BIERMANN, C. J. **Handbook of pulping and papermaking**. 2. ed. London: Academic Press, 1996.

BOOT-HANDFORD, M. E. et al. Carbon Capture and Storage update. **Energy & Environmental Science**, v. 7, p. 130-189, 2014.

BRAND, M. A. et al. Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing. **Renewable Energy**, v. 111, p. 116- 123, 2017.

BREWER, C. E. et al. Biochar Characterization and Engineering. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (eds.). **Biochar for Environmental Management**. London: Earthscan, 2009.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68-94, 2012.

BRITO, O. J.; FERREIRA, M.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: Densidade Básica da madeira x Densidade Aparente do carvão - Perspectivas de melhoramento. **Boletim Informativo**, ESALQ/USP: Piracicaba, v. 6, n. 16, p. 1-9, jul. 1978.

BROWNING, B. L. **Methods of Wood Chemistry**. New York: Interscience Publishers, 1963.

BUI, M. et al. Carbon Capture and Storage (CCS): The way forward. **Energy & Environmental Science**, v. 11, p. 1062-1176, 2018.

BULUT, E.; ÖZACAR, M.; ŞENGİL, I. A. Adsorption of malachite green onto bentonite: Equilibrium and kinetic studies and process design. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 115, n. 3, p. 234–246, 2008.

CAETANO, J. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos produzidos a partir da reciclagem dos resíduos de café para uso na construção civil**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

CAIELLI, E. L. Uso da palha de café na alimentação de ruminantes. **Informe Agropecuário**, v. 10, n. 119, p. 36-38, 1984.

CAI, J. et al. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 309-322, 2017.

CAPRA, F. et al. Biogas upgrading by amine scrubbing: solvent comparison between MDEA and MDEA/MEA blend. **Energy Proceedings**, v. 148, p. 970-977, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.065>. Acesso em: 10 out. 2024.

CÁRDENAS-AGUIAR, E. et al. the effect of biochar and compost from urban organic waste on plant biomass and properties of an artificially copper polluted soil. **Int Biodeterior**

Biodegrad, v. 124, p. 223–232, 2017.

CASARA, V. et al. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA DE MILHO. In: COBEQ IC, 2017. Anais 2017. p. 1295-1300.

CHEN, W. et al. A new insight into chemical reactions between biomass and alkaline additives during pyrolysis process. **Proc. Combust. Inst.**, v. 38, n. 3, p. 3881–3890, 2021b.

CHEN, W. et al. Insight into KOH activation mechanism during biomass pyrolysis: chemical reactions between O-containing groups and KOH. **Appl. Energy**, v. 278, p. 115730, 2020.

CHEN, W. et al. Insight into KOH activation mechanism during biomass pyrolysis: Chemical reactions between O-containing groups and KOH. **Applied Energy**, v. 278, p. 115730, 2020.

COATES, J. Interpretation of infrared spectra, a practical approach. **Encyclopedia Analyt. Chem.**, v. 12, p. 10815–10837, 2000.

CYCHOSZ, K. A. et al. Avanços recentes na caracterização textural de materiais nanoporosos hierarquicamente estruturados. **Português Química. Soc. Rev.**, v. 46, p. 389–414, 2017.

CHA, J. S. et al. Production and utilization of biochar: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 40, p. 1-15, 2016.

CHEN, W.-Y.; SUZUKI, T.; LACKNER, M. (ed.). **Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation**. 2. ed. Cham: Springer, 2017.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, Brasília, DF, v. 11, n. 2, segundo levantamento, maio 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 7, sétimo levantamento, abril 2024.

DALE, S. P. **BP. Statistical Review of World Energy**. 70. ed. London, UK: BP Plc, 2021. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em: 01 abr. 2024.

DEHKHODA, A. M.; WEST, A.; ELLIS, N. Biochar based solid acid catalyst for biodiesel production. **Applied Catalysis A-General**, v. 382, p. 197-204, 2010.

DA SILVA, F. F. et al. Determinação de teores químicos da casca de arroz (*Oryza sativa*) e pseudocaule da bananeira (*Musa cavendishii*) no Tocantins: análise comparativa. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 8, p. 9654–9674, 2023.

DA SILVA, J. E. et al. Rev. Virtual Quim., 2018. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 5, 2018.

DE CASTRO, A. E. et al. Influence of Methyl Groups in Triphenylmethane Dyes on Their Adsorption on Biochars from Coffee Husks. **Water Air Soil Pollut**, v. 233, p. 180, 2022.

DE CASTRO, A. E. et al. Influence of Methyl Groups in Triphenylmethane Dyes on Their Adsorption on Biochars from Coffee Husks. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 233, n. 6, 2022.

DE BORJA REIS, A. F. et al. Environmental factors associated with nitrogen fixation prediction in soybean. **Frontiers, Plant Sci.**, v. 12, p. 1013, 2021.

DEHKHODA, A. M.; WEST, A.; ELLIS, N. Biochar based solid acid catalyst for biodiesel production. **Applied Catalysis A: General**, v. 382, p. 197-204, 2010.

DENG, J. et al. Competitive adsorption of Pb(II), Cd(II) and Cu(II) onto chitosan- pyromellitic dianhydride modified biochar. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 506, p. 355–364, 2018.

DING, S.; LIU, Y. Adsorption of CO₂ from flue gas by novel seaweed-based KOH- activated porous biochars. **Fuel**, v. 260, p. 116382, 2020.

DIONIZIO, A. F. **Aproveitamento energético de resíduos agroindustriais no Distrito Federal**. 2017. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

DISSANAYAKE, P. [Outras Referências] In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online**. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100053&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 20 abr. 2024.

DISSANAYAKE, P. D. et al. Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, 109582, 2020.

FAN, Y. et al. Enhanced adsorption of Pb(II) by nitrogen and phosphorus co-doped biochar derived from Camellia oleifera shells. **Environmental Research**, v. 191, 110030, 2020.

FAR-GHALI, M. et al. Integration of biogas systems into a carbon zero and hydrogen economy: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, p. 2853– 2927, 2022.

FENWICK, D. E.; OAKENFULL, D. Saponin content of food plants and some prepared foods. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 34, n. 2, p. 186–191, 1983.

FERREIRA, F. DE A. **Caracterização do pó de café conilon verde e perspectivas para o seu aproveitamento sustentável**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus Colatina, Colatina, 2023.

FU, Y. et al. Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption. **Science of The Total Environment**, v. 646, p. 1567-1577, 2019.

GAO, X. et al. Materiais carbonáceos como adsorventes para captura de CO₂. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 4, 100039, 2022.

GOEL, C. et al. Novel nitrogen enriched porous carbon adsorbents for CO₂ capture: breakthrough adsorption study. **Journal of Environmental, Chem. Eng.**, v. 4, p. 346–356, 2016.

GUO, S. et al. Recent advances in biochar-based adsorbents for CO₂ capture. **Carbon Capture Science and Technology**, v. 4, 100059, 2022.

HAELDERMANS, T. et al. Uma avaliação técnico–econômica comparativa da produção de biochar a partir de diferentes fluxos de resíduos usando pirólise convencional por microondas. **Bioresource Technology**, v. 318, 124083, 2020.

HALDER, D.; PURKAIT, M. K. Uma revisão sobre as técnicas emergentes ecologicamente corretas para o pré-tratamento de biomassa lignocelulósica: visão mecanística e avanços. **Quimosfera**, v. 264, 128523, 2021.

HARIMISA, G. E. et al. Influence of furnace atmospheres and potassium hydroxide activation on the properties of bamboo activated carbon and its adsorption towards 4-nitrophenol. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 198, p. 325–339, 2023.

HOANG, T.-D.; LIU, Y.; LE, M. T. Synthesis and Characterization of Biochars and Activated Carbons Derived from Various Biomasses. **Sustainability**, v. 16, p. 5495, 2024.

HONG, W. Y. A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO₂ emissions future. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 3, 100044, 2022.

“HUSK”. In: **Oxford English Dictionary**. 4 de agosto de 2025. Disponível em: https://www.oed.com/dictionary/husk_n1?tab=factsheet#1188940. Acesso em: 10 out. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: [https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2024/estProdAgri_202411.pdf#:~:text=A%20%C3%A1rea%20a%20ser%20colhida%20foi%20de,e%20a%20soja%20s%C3%A3o%20os%20tr%C3%AAs%20principais](https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2024/estProdAgri_202411.pdf#:~:text=A%20%C3%A1rea%20a%20ser%20colhida%20foi%20de,e%20a%20soja%20s%C3%A3o%20os%20tr%C3%AAs%20principais). Acessado em set. 2025.

IGALAVITHANA, A. D. et al. Carbon dioxide capture in biochar produced from pine sawdust and paper mill sludge: Effect of porous structure and surface chemistry. **Science of the Total Environment**, v. 739, 139845, 2020.

IJAZ, M. et al. Aplicação combinada de consórcios biochar e PGPR para produção sustentável de trigo em condições semiáridas com dose reduzida de fertilizante sintético. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 50, p. 449-458, 2019.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE – IBI. Disponível em: <https://biochar-international.org/resources/biochar-classification-tool/ibi-biochar-classification-tool-main-page/>. Acesso em: nov. 2023.

IPCC. **The Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 10 jun. 2022.

JACKSON, C. J. C. et al. Effects of processing on the content and composition of isoflavones during manufacturing of soy beverage and tofu. **Process Biochemistry**, v. 37, n. 10, p. 1117–1123, 2002.

JALILIAN, M. et al. A review: Hydrochar as potential adsorbents for wastewater treatment and CO₂ adsorption. **Sci. Total Environ.**, v. 914, p. 169823, 2024.

JANISSEN, B.; HUYNH, T. Chemical composition and value-adding applications of coffee industry byproducts: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 128, p. 110-117, 2018.

JANG, E. et al. Desenvolvimento de um adsorvente econômico de CO₂ a partir de coque de petróleo via ativação de KOH. **Applied Surface Science**, v. 429, p. 62-71, 2018.

JENSEN, A. et al. TG-FTIR. Study of the influence of potassium chloride on wheat straw pyrolysis. **Energy and Fuels**, v. 12, n. 5, p. 929–938, 1998.

JIANG, T.-J. et al. Thermochemical Conversion of Biomass into Biochar: Enhancing Adsorption Kinetics and Pore Properties for Environmental Sustainability. **Sustainability**, v. 16, 6623, 2024.

JIMÉNEZ-ZAMORA, A.; PASTORIZA, S.; RUFIÁN-HENARES, J. A. Revalorization of coffee by-products. Prebiotic, antimicrobial and antioxidant properties. **LWT - Food Science and Technology**, v. 61, p. 12-18, 2015.

JUNG, S. et al. Strategic use of biochar for CO₂ capture and sequestration. **J. CO₂ Util.**, v. 32, p. 128–139, 2019.

KAMRAN, U.; PARK, S.-J. Chemically modified carbonaceous adsorbents for enhanced CO₂ capture: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, 125776, 2021.

KHALIL, K. M. S. et al. Nanostructured P-doped activated carbon with improved mesoporous texture derived from biomass for enhanced adsorption of industrial cationic dye contaminants. **Mater. Chem. Phys.**, v. 282

KHANDANLOU, R. et al. Feasibility Study and Structural Analysis of Cellulose Isolated from Rice Husk: Microwave Irradiation, Optimization, and Treatment Process Scheme. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 5751-5766, 2016.

KHOSHRAFTAR, Z.; GHAEMI, A. Presence of activated carbon particles from waste walnut shell as a biosorbent in monoethanolamine (MEA) solution to enhance carbon dioxide absorption. **Heliyon**, v. 8, e08689, 2022.

KIM, D.; HADIGHEH, S. A. Oxidative pyrolysis of biosolid: Air concentration effects on biochar formation and kinetics. **Renewable Energy**, v. 224, p. 120106, 2024.

KUHAD, R. C.; SINGH, A.; ERICKSSON, K. E. Microorganisms and enzymes involved in the degradation of plant fiber cell walls. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology**, v. 57, p. 45–125, 1997.

KUMAR, S.; SRIVASTAVA, R.; KOH, J. Utilization of zeolites as CO₂ capturing agents: Advances and future perspectives. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 41, 101251, 2020.

LAKSHMI, U. R. et al. Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for Indigo Carmine dye. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 2, p. 710–720, 2009.

LEE, J. et al. Silica-Supported Sterically Hindered Amines for CO₂ Capture. **Langmuir**, v. 34, p. 12279-12292, 2018.

LEE, N. et al. Conversion of cattle manure into functional material to remove selenate from wastewater. **Chemosphere**, v. 278, 130398, 2021.

LEE, S. Y.; PARK, S. J. Uma revisão sobre adsorventes sólidos para captura de dióxido de carbono. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 23, p. 1-11, 2014.

LEE, Y. et al. Biochar as a catalytic material for the production of 1,4-butanediol and tetrahydrofuran from furan. **Environmental Research**, v. 184, 109325, 2020.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015.

LI, YANHUA. et. al. Ultrahigh surface area hierarchical porous carbon derived from biomass via a new KOH activation strategy for high-performance supercapacitor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, part A, p. 67-80, 2024.

LI, B. Z. et al. Process optimization to convert forage and sweet sorghum bagasse to ethanol based on ammonia fiber expansion (AFEX) pre-treatment. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 1285-1292, 2010.

LIM, H. K. et al. Adsorption of carbon dioxide (CO₂) by activated carbon derived from waste coffee grounds. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 765, 012034, 2021.

LINDEN, H. How to justify a pragmatic position on anthropogenic climate change. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 5, p. 1209-1219, 2005.

LIU, F. et al. Facile preparation of N and O-rich porous carbon from palm sheath for highly selective separation of CO₂/CH₄/N₂ gas-mixture. **Chemical Engineering Journal**, v. 399, 125812, 2020.

LV, L. et al. Biochar activated by potassium carbonate to load organic phase change material: Better performance and environmental friendliness. **Industrial Crops and Products**, v. 204, 117184, 2023.

MANCHISI, J. et al. Ironmaking and steelmaking slags as sustainable adsorbents for industrial effluents and wastewater treatment: a critical review of properties, performance, challenges and opportunities. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 2118, 2020.

MARTELLI-TOSI, M. et al. Chemical treatment and characterization of soybean straw and

soybean protein isolate/straw composite films. **Carbohydrate Polymers**, v. 157, p. 512-520, 2017.

MARTELLI-TOSI, M. et al. Chemical treatment and characterization of soybean straw and soybean protein isolate/straw composite films. **Carbohydrate Polymers**, v. 157, p. 512–520, 2017.

MASCARENHAS, H. A. A. et al. Efeito residual de leguminosas sobre o rendimento físico e econômico da cana-planta. Campinas: **Instituto Agrônômico**, 2001. (Boletim científico, 32).

MASOUMI, H.; GHAEMI, A.; GILANI, H. G. Evaluation of hyper-cross-linked polymers performances in the removal of hazardous heavy metal ions: a review. **Separation and Purification Technology**, v. 260, 118221, 2021.

MESSINA, M. Soy foods, isoflavones, and the health of postmenopausal women. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 89, n. 5, p. 1668S-1682S, 2009.

MOBARAK, M. et al. Statistical physics modeling and interpretation of methyl orange adsorption on high-order mesoporous composite of MCM-48 silica with treated rice husk. **Journal of Molecular Liquids**, v. 285, p. 678–687, 2019.

MORAIS, J. P. S.; ROSA, M. de F.; PINO MARCONCINI, J. M. **Procedimentos para análise lignocelulósica**. Embrapa Algodão, 2010.

MUELLER, M.; EGERT, S.; LAMPEN, A. Metabolism of selected isoflavones and effects on cellular signaling in human intestinal Caco-2 cells. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 57, n. 3, p. 504–515, 2013.

MUKHERJEE, A. et al. Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. **Journal of Environmental Sciences**, v. 83, p. 46-63, 2019.

MUNIZ, R. N. "Educação e biomassa". In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online**. Campinas: [s. n.], 2002.

MUSTAFA, A. et al. Current technology development for CO₂ utilization into solar fuels and chemicals: A review. **Journal of Energy Chemistry**, v. 49, p. 96-123, 2020.

NAGANO, T. et al. Improved physicochemical and functional properties of okara, a soybean residue, by nanocellulose technologies for food development – A review. **Food Hydrocolloids**, v. 109, p. 105964, 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. Disponível em: [https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide#:~:text=imprimir-Destaques,em%20um%20ano%20j%C3%A1%20registrado](https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide#:~:text=imprimir,Destaques,em%20um%20ano%20j%C3%A1%20registrado). Acesso em: 04 out. 2025

NIE, L. et al. Recent developments and consideration issues in solid adsorbents for CO₂ capture from flue gas. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 11, p. 2303-2317, 2018.

NIGLIO, S. et al. Combined pretreatments of coffee silverskin to enhance fermentable sugar

yield. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 10, p. 1237- 1249, 2020.

NUNES, C. Carbon dioxide levels are at a record high. Here's what you need to know. **National Geographic**, 2019. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/greenhouse-gases>. Acesso em: 24 jul. 2025.

NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. de O. **O solo: estrutura e composição**. São Carlos: Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2022. Disponível em: <https://recursosolo.iqsc.usp.br/livro-1-o-solo/>. Acesso em: 23 maio 2024.

OHARA, M. A.; SANTOS, M. P. O. **Estudo cinético da pirólise da biomassa palha de milho verde**. 2016. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016.

OKOLIE, J. A. et al. Valorization of cattle manure for biofuels and value-added products: recent trends, opportunities, and challenges. **Science of the Total Environment**, v. 758, 143716, 2021.

OLESZEK, W. et al. Saponins and their effect on health. **British Journal of Nutrition**, v. 88, p. 467-472, 2002.

OTA, T. et al. Estudo sobre as características de adsorção de CO₂ em aminas heterocíclicas. **Applied Surface Science**, v. 420, p. 119-125, 2017.

OZYUGURAN, A. A.; YAMAN, S. Optimal use of condensed parameters of ultimate analysis to predict the calorific value of biomass. **Fuel**, v. 214, p. 640-646, 2018.

PANDA, S.; JAIN, M. S. A systematic review of prevalent soy waste management techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 212, 115305, 2025.

PANDIARAJAN, A. et al. OPAC (orange peel activated carbon) derived from waste orange peel for the adsorption of chlorophenoxyacetic acid herbicides from water: Adsorption isotherm, kinetic modelling and thermodynamic studies. **Bioresour Technol**, v. 261, p. 329-341, 2018.

PEREIRA, R. G. et al. Sistemas de manejo do solo: soja [Glycine max (L.)] consorciada com Brachiaria decumbens (Stapf). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 44-51, 2011.

PEREIRA, M. A. **Avaliação de estruturas derivadas da casca de arroz como adsorventes de corantes catiônicos e aniônicos**. 2022. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

PETROFF, V. V. **As novas tecnologias na produção agrícola**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2021. Disponível em: <https://www.unicamp.br/tecnologias/novas.html>. Acesso em: 20 abr. 2024.

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1468-1485, 2016.

RASHID, R. et al. A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 9050-9066, 2021.

REDDY, N.; YANG, Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. **Trends in Biotechnology**, v. 23, p. 22-27, 2005.

REN21. **Renewables 2023 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2023. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2023/>. Acesso em: 15 maio 2024.

REUTERS. **Companhia Brasileira de Açúcar e Alcool**. São Paulo: Thomson Reuters, 2022. Disponível em: <https://br.reuters.com/>. Acesso em: 10 jun. 2022.

RODRIGUES, J. et al. The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice. **European Journal of Soil Science**, 2023.

ROWELL, R. M. et al. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

RUDZINSKI, W.; EVERETT, D. H. **Adsorption of gases on heterogeneous surfaces**. London: Academic Press, 1992.

SAINI, J. K.; SAINI, R.; TEWARI, L. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. **3 Biotech**, v. 5, p. 337–353, 2015.

SANTOS, L. C. S. et al. Composição química e térmica da casca de arroz visando a produção de sílica. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 18, n. 2, p. 161-167, 2016.

SANTOS, M. G. B. et al. Biochar as a Feedstock for Sustainable Fertilizers: Recent Advances and Perspectives. **Agriculture**, v. 15, n. 8, p. 894, 2025.

SANTOS, R. M. et al. Pyrolysis of the Caupi Bean Pod (*Vigna unguiculata*): Characterization of Biomass and Bio-Oil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 31, n. 6, p. 1125-1136, 2020.

SARKAR, N. et al. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. **Renewable Energy**, v. 37, p. 19-27, 2012.

SHARMA, P. et al. Removal of methylene blue from aqueous waste using rice husk and rice husk ash. **Desalination**, v. 259, n. 1–3, p. 249–257, 2010.

SHEN, Y. Preparation of renewable porous carbons for CO₂ capture – A review. **Fuel Processing Technology**, v. 236, p. 107437, 2022.

SHEN, Y. et al. Biomass pyrolysis with alkaline-earth-metal additive for co- production of bio-oil and biochar-based soil amendment. **The Science of the Total Environment**, v. 743, 140760, 2020.

SHEN, Y. Rice husk silica derived nanomaterials for sustainable applications. **Renewable and**

Sustainable Energy Reviews, v. 80, p. 453-466, 2017.

SHUKLA, N.; SRIVASTAVA, A. K. Desenvolvimento de aerogéis de carbono para captura de CO₂. **Journal of Porous Materials**, v. 25, p. 1287-1295, 2018.

SILVA, F. B. da et al. Tecnologia ambiental aplicada ao manejo de resíduos agroindustriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 25., 2024, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: CBEQ, 2024.

SILVA, M. S. **Utilização da biomassa de cascas café (coffea u arabica) como biossorvente para a remoção do agroquímico Diuron® de matrizes aquosas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Ceres, 2019.

SINGH, P.; KRISHNASWAMY, K. Sustainable zero-waste processing system for soybeans and soy by-product valorization. **Trends in Food Science & Technology**, v. 128, p. 331–344, 2022.

SIOPONGCO, J. D. et al. Investigation of CO₂ adsorption from simulated flue gas using polyethyleneimine-impregnated silicate-based sorbents. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, 103769, 2020.

“STRAW”. In: **Oxford English Dictionary**. 4 de agosto de 2025. Disponível em: https://www.oed.com/dictionary/straw_n1?tab=factsheet#20543530. Acesso em: 10 out. 2024.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 1-11, 2002.

SUN, Y. et al. Nitrogen-doped biochar derived from corn straw for CO₂ adsorption: a new vision on nitrogen sources comparison. **Carbon Research**, v. 3, 61, 2024.

TABASSAM, N. et al. Facile synthesis of cinnamic acid sensitized rice husk biochar for removal of organic dyes from wastewaters: Batch experimental and theoretical studies. **Materials Chemistry and Physics**, v. 288, 126425, 2022.

TAPIA-BLÁCIDO, D. R.; MANIGLIA, B. C.; MARTELLI-TOSI, M. Biopolymers from Sugarcane and Soybean Lignocellulosic Biomass. In: TANG, C.; RYU, C. Y. (eds.). **Sustainable Polymers from Biomass**. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 467-481, 2016.

VALE, A. T. do; DANTAS, V. F. de S.; ZAMBRZYCKI, G. C. Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zea mays*). **Evidência**, v. 13, n. 2, p. 153-164, 2013.

VAUGHN, S. F. et al. Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochars from agricultural residues. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 219–224, 2013.

VEGA, F. et al. Use of amines to capture CO₂ from biogas. **Chemical Engineering Journal**, v. 320, p. 586-592, 2017.

WANG, X. et al. High-temperature pyrolysis and fusion kinetics of corn straw: Effects on yield, morphology, and pore structure. **Journal of the Energy Institute**, v. 123, p. 102237, 2025.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002–1022, 2019.

WANG, L. et al. Sintering behavior of agricultural residues ashes and effects of additives. **Energy and Fuels**, v. 26, n. 9, p. 5917–5929, 2012.

WORLD BANK. **Agricultural Land (% of Land Area)**. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.ZS>. Acesso em: 23 maio 2024.

XIAO, J. et al. Nitrogen-doped porous carbon for excellent CO₂ capture: A novel method for preparation and performance evaluation. **Separation and Purification Technology**, v. 298, 121602, 2022.

XU, G.; YANG, X.; SPINOSA, L. Development of sludge-based adsorbents: Preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 151, p. 221-232, 2015.

XUE, Q.; XIE, S.; ZHANG, T. Biochar production and modification for environmental improvement. In: XUE, Q.; XIE, S.; ZHANG, T. **Biochar in Agriculture: Achieving Sustainable Development Goals**. Amsterdam: Elsevier, 2022. p. 181-191.

YEUNG, P. T. et al. Preparation and characterization of bio-safe activated charcoal derived from coffee waste residue and its application for removal of lead and copper ions. **RSC Advances**, v. 4, p. 38839-38847, 2014.

YOUNAS, M. et al. Recent progress and remaining challenges in post-combustion CO₂ capture using metal-organic frameworks (MOFs). **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 80, 100849, 2020.

YUAN, X. et al. Applied Machine Learning for Prediction of CO₂ Adsorption on Biomass Waste-Derived Porous Carbons. **Environmental Science & Technology**, v. 55, p. 11925-11936, 2021.

YU, C.; HUANG, C.; TAN, C.; CHEN, B. CO₂ capture by amine scrubbing systems and adsorption: a comparative study. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 52, p. 627-638, 2013.

ZHANG, H. et al. Optimizing lignocellulose conversion: A comparative study of alkali-assisted ball milling pretreatment of cotton stalk and corn stover. **Journal of Biotechnology**, v. 408, p. 15-27, 2025.

ZHANG, X. et al. Preparation of high-value porous carbon by microwave treatment of chili straw pyrolysis residue. **Bioresour Technol**, v. 360, n. 127520, 2022.

ZIAEI-RAD, Z. et al. Investigation of a robust pretreatment technique based on ultrasound-assisted, cost-effective ionic liquid for enhancing saccharification and bioethanol production from wheat straw. **Scientific Reports**, v. 13, 446, 2023.

ZHU, Y. et al. Ash Fusion Characteristics and Transformation Behaviors during Bamboo Combustion in Comparison with Straw and Poplar. **Energy & Fuels**, v. 32, n. 4, p. 5244-5251, 2018.