



Potencial de biomassas lignocelulósicas aplicadas à captura de Dióxido de Carbono (CO₂)

Naiara Lima Costa

Doutoranda, Unesp, Brasil

naiara.costa@unesp.br

ORCID iD: 0009-0009-5972-5640

Júnior da Silva Camargo

Doutorando, Unesp, Brasil

junior.silva@ms.senai.br

ORCID iD: 0000-0002-7685-5879

Dener da Silva Souza

Mestrando, Unesp, Brasil

dener.souza@unesp.br

ORCID iD: 0009-0002-7136-4445

Michael Jones da Silva

Professor Doutor, Unesp, Brasil

michael.silva@unesp.br

ORCID iD: 0000-0002-2971-1696



Potencial de biomassas lignocelulósicas aplicadas à captura de Dióxido de Carbono (CO₂)

RESUMO

Objetivo - O objetivo do presente trabalho é, por meio de uma revisão sistemática da literatura, analisar a contribuição de biomassas lignocelulósicas na captura de dióxido de carbono (CO₂), além de identificar os principais fatores de influência avaliados nas pesquisas relacionadas.

Metodologia - O trabalho foi fez uso da metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*). Na investigação foram utilizados os termos "lignocellulosic biomass", "carbon dioxide" e "adsorption" de forma concomitante e direcionados ao título, resumo e palavras-chave dos estudos. Os trabalhos selecionados foram publicados no período entre 2020 e 2024 e não incluem artigos de revisão.

Originalidade/relevância - Advindo de mudanças climáticas cada vez mais evidentes, é imprescindível que recursos naturais renováveis e, sobretudo, resíduos desses recursos, sejam estudados e encorajados enquanto biomateriais direcionados a utilizações com potencial de mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE). Múltiplas biomassas possuem características favoráveis a adsorção de inúmeras substâncias e, dado uma vasta quantidade de espécies com características diversas, se faz necessário avaliar suas principais contribuições. Além disso, a avaliação de biocarvões de resíduos de biomassa conduz a valorização do produto, com baixo custo associado e com o favorecimento da inovação.

Resultados - Os trabalhos evidenciam a alta capacidade de adsorção de biomassas distintas, favorecidas por processos de ativação ou outros tratamentos. Além disso, são evidenciadas as influências da temperatura e pressão no processo, demonstrando caminhos que são favorecidos.

Contribuições teóricas/metodológicas - Os fatores que influenciam a aplicabilidade de um material, especialmente, de um resíduo de recurso renovável, são fundamentalmente importantes para a compreensão da efetividade dos processos e reprodução laboratorial ou comercial. Temperatura e pressão afetam diretamente a eficiência dos processos e a ativação de um biocarvão depende diretamente da metodologia utilizada, o que influencia na sua capacidade adsorptiva. Revisões sistemática de literatura oferecem uma síntese consolidada de práticas e abordagens, demonstrando tendências e avaliações majoritariamente empregadas, permitindo a utilização de metodologias eficientes.

Contribuições sociais e ambientais - O trabalho evidencia quais são as contribuições na literatura recente de biomassas lignocelulósicas na captura de carbono, principal gás responsável pelo efeito estufa. Tendo em vista que o Brasil é um dos países mais biodiversos e com uma grande produção de distintos materiais vegetais, é importante entender resíduos enquanto potenciais materiais aliados à mitigação.

PALAVRAS-CHAVE: Descarbonização. Adsorção. Biocarvão.

Potential of lignocellulosic biomass applied to Carbon Dioxide (CO₂) capture.

ABSTRACT

Objective - The objective of this study is, through a systematic literature review, to analyze the contribution of lignocellulosic biomass in carbon dioxide (CO₂) capture, as well as to identify the main influencing factors assessed in related research.

Methodology - The study used the PRISMA methodology (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*). In the investigation, the terms "lignocellulosic biomass," "carbon dioxide," and "adsorption" were used concurrently and directed to the title, abstract, and keywords of the studies. The selected papers were published between 2020 and 2024 and do not include review articles.

Originality/Relevance - Driven by increasingly evident climate changes, it is essential that renewable natural resources, and especially the waste from these resources, be studied and promoted as biomaterials aimed at uses with the potential to mitigate Greenhouse Gas (GHG) emissions. Multiple biomasses have characteristics favorable for the adsorption of various substances, and given the vast number of species with diverse traits, it is necessary to



evaluate their main contributions. Furthermore, the evaluation of biochars from biomass waste leads to the valorization of the product, with low associated costs and fostering innovation.

Results – The studies highlight the high adsorption capacity of different biomasses, enhanced by activation processes or other treatments. Furthermore, the influences of temperature and pressure on the process are emphasized, demonstrating the pathways that are favored.

Theoretical/Methodological Contributions – The factors that influence the applicability of a material, especially that of a renewable resource waste, are fundamentally important for understanding the effectiveness of processes and their laboratory or commercial reproduction. Temperature and pressure directly affect the efficiency of processes, and the activation of a biochar depends directly on the methodology used, which influences its adsorption capacity. Systematic literature reviews provide a consolidated synthesis of practices and approaches, demonstrating trends and predominantly used assessments, allowing for the use of efficient methodologies.

Social and Environmental Contributions - The study highlights the contributions in recent literature regarding lignocellulosic biomasses in carbon capture, the primary gas responsible for the greenhouse effect. Given that Brazil is one of the most biodiverse countries and has a large production of various plant materials, it is important to understand waste as potential materials in the fight against mitigation.

KEYWORDS: Decarbonization. Adsorption. Biochar.

Potencial de las biomasas lignocelulósicas aplicadas a la captura de Dióxido de Carbono (CO₂)

RESUMEN

Objetivo – El objetivo de este trabajo es, mediante una revisión sistemática de la literatura, analizar la contribución de las biomasas lignocelulósicas en la captura de dióxido de carbono (CO₂), además de identificar los principales factores de influencia evaluados en las investigaciones relacionadas.

Metodología – El trabajo utilizó la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses). En la investigación se emplearon los términos “lignocelulósic biomass”, “carbon dioxide” y “adsorption” de forma concomitante y dirigidos al título, resumen y palabras clave de los estudios. Los trabajos seleccionados fueron publicados entre 2020 y 2024 y no incluyen artículos de revisión.

Originalidad/Relevancia – Debido a los cambios climáticos cada vez más evidentes, es imprescindible que los recursos naturales renovables y, sobre todo, los residuos de estos recursos, sean estudiados y promovidos como biomateriales dirigidos a usos con potencial de mitigación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Múltiples biomasas presentan características favorables para la adsorción de diversas sustancias y, dado el gran número de especies con características distintas, es necesario evaluar sus principales contribuciones. Además, la evaluación de biocarbonos a partir de residuos de biomasa lleva a la valorización del producto, con bajo costo asociado y promoviendo la innovación.

Resultados – Los trabajos evidencian la alta capacidad de adsorción de distintas biomasas, favorecidas por procesos de activación u otros tratamientos. Además, se destacan las influencias de la temperatura y la presión en el proceso, demostrando los caminos que se ven favorecidos.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – Los factores que influyen en la aplicabilidad de un material, especialmente de un residuo de recurso renovable, son fundamentalmente importantes para comprender la efectividad de los procesos y su reproducción en laboratorio o en el ámbito comercial. La temperatura y la presión afectan directamente la eficiencia de los procesos, y la activación de un biocarbón depende directamente de la metodología utilizada, lo que influye en su capacidad adsorptiva. Las revisiones sistemáticas de literatura ofrecen una síntesis consolidada de prácticas y enfoques, demostrando tendencias y evaluaciones mayoritarias, lo que permite el uso de metodologías eficientes.

Contribuciones Sociales y Ambientales - El trabajo destaca las contribuciones en la literatura reciente sobre biomasas lignocelulósicas en la captura de carbono, principal gas responsable del efecto invernadero. Dado que Brasil es uno de los países más biodiversos y cuenta con una gran producción de diversos materiales vegetales, es importante entender los residuos como materiales potenciales en la mitigación.

PALABRAS CLAVE: Descarbonización. Adsorción. Biocarbón.



1 INTRODUÇÃO

A evolução do desenvolvimento atrelada à fatores tecnológicos e científicos direcionou a pesquisa às mudanças climáticas, emissões de gases de efeito estufa, segurança energética e impactos ambientais (Cruz *et al.*, 2022). Assim, a busca por fontes renováveis de energia e biomateriais intensifica-se à medida que os conceitos de sustentabilidade são promovidos e compreendidos. Além disso, consoante aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, que preconiza energia limpa e acessível, consumo e produção sustentáveis e ação contra a mudança global do clima, a biomassa surge como fonte promissora em distintos setores econômicos. Nesse contexto, a base da bioeconomia direciona-se à biomassa (Robinson e Sobrinho, 2022), que apesar de seu notório potencial, encontra, dentre outros, desafios técnicos envolvendo o desenvolvimento ou melhoramento de tecnologias envolvidas nos processos (Menoncin *et al.*, 2023).

O biocarvão, ou *biochar*, é um material que pode ser obtido pela decomposição térmica da biomassa em ambiente controlado e na ausência de oxigênio, processo que é denominado pirólise. As aplicações do biocarvão, fase sólida do processo, incluem práticas agrícolas, adsorção de metais e corantes e captura e armazenagem de carbono (Silva *et al.*, 2023). Nesse contexto, a biomassa lignocelulósica (composta por celulose, hemicelulose e lignina) é um recurso promissor para a produção do insumo, com potenciais aplicações em múltiplos setores e com vantagens quanto à reciclagem e baixo custo (Jayakumar *et al.*, 2023). Além disso, esse é um recurso comumente associado a resíduos agroindustriais e florestais (Zou *et al.*, 2022). Contudo, seus componentes e suas proporções traçam o perfil de decomposição da amostra lignocelulósica, que depende diretamente da natureza da amostra, da taxa de aquecimento, do fluxo de gás inerte e de outras condições operacionais (Jibril *et al.*, 2008).

No caso do dióxido de carbono, o gás originado por causas antropogênicas é um dos problemas contemporâneos por estar relacionado a intensificação do efeito estufa (Ribeiro e Lopes, 2022). Com isso, na historicidade, seu nível de concentração tem aumentado vertiginosamente, causando efeitos drásticos na poluição do ar. Nesse âmbito, dentre as aplicações para o biocarvão, a adsorção de dióxido de carbono (CO_2) mostra potencial promissor, podendo contribuir diretamente com a mitigação dos gases responsáveis pelas mudanças climáticas (Silva *et al.*, 2025). Além disso, de acordo com de Souza (2023), a captura e o armazenamento de carbono mediante biocarvões é uma tecnologia viável e com possibilidade de comercialização.

Inúmeros estudos avaliam distintos aspectos do biocarvão, que tem capacidade de captura influenciada por propriedades físico-químicas, consequência do tipo de biomassa e das características da pirólise (dos Santos *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2015). Outro ponto em destaque é que o aumento da porosidade do material e consequente aumento da capacidade de adsorção, por exemplo, pode ser feito por ativação, o que aparece em parte das investigações da literatura. Nesse aspecto, são investigadas as ativações química e física. Na ativação química é feita a impregnação de agentes desidratantes sobre a matéria-prima ainda não carbonizada e,



na ativação física, é realizada a oxidação do material já carbonizado com vapor d'água, dióxido de carbono ou uma mistura desses gases a alta temperatura ($> 800^{\circ}\text{C}$). Para Durán-Jiménez *et al.* (2022), a ativação é uma das mais versáteis e úteis aplicações para materiais adsorventes. Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo, através da revisão sistemática de literatura, analisar a contribuição de distintas biomassas lignocelulósicas em relação à adsorção de dióxido de carbono, levantando dados técnicos da metodologia e fatores de influência avaliados.

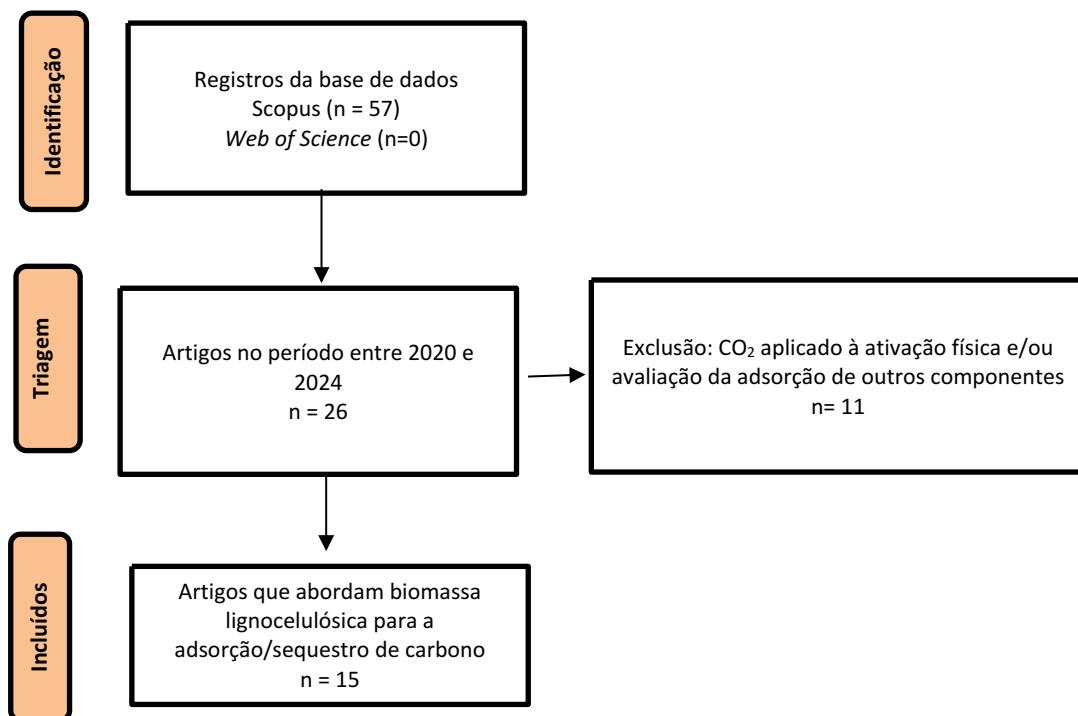
2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é avaliar na literatura recente quais são as principais contribuições das biomassas lignocelulósicas na adsorção de dióxido de carbono e quais os principais parâmetros avaliados nesses estudos, bem como eles contribuem para a mudança no processo de captura.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi estabelecido através da metodologia PRISMA, do acrônimo em inglês *“Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses”*, em abordagem qualitativa, setorizada nas etapas que aparecem na Figura 1. Através da base de dados Scopus e *Web of Science* foi realizada a identificação dos trabalhos que abordam a aplicação de biomassas lignocelulósicas aplicadas à descarbonização. A seleção dos artigos se deu pela inclusão dos termos em inglês *“lignocellulosic biomass AND carbon dioxide AND adsorption”* e a inclusão dos filtros direcionando as sentenças ao título, resumo e palavras-chave dos trabalhos. O período de análise foi reduzido a cinco anos (2020 a 2024). Na etapa de triagem foram excluídos os trabalhos cujo direcionamento ao dióxido de carbono foi dado enquanto uma ativação física do biocarvão e/ou a avaliação de adsorção foi direcionada à outra substância. Após essa exclusão, foram selecionados os trabalhos publicados que evidenciam a literatura recente da biomassa lignocelulósica. A mesma busca foi realizada na base *Web of Science (Wos)*, porém sem retorno de resultados.

Figura 1 - Diagrama de fluxo PRISMA, indicando a metodologia segundo o número de resultados obtidos na plataforma Scopus, em cada etapa envolvida na pesquisa (Elaborada a partir de PAGE (2021)



4 RESULTADOS

Os artigos selecionados são apresentados na matriz analítica que sintetiza as informações: biomassa utilizada, objetivos gerais, principal metodologia e alguns resultados pertinentes, apresentados na Tabela 1.



Tabela 1 – Revisão sistemática

Trabalho	Biomassa	Objetivos	Metodologia	Alguns resultados
Jerzak <i>et al.</i> (2024)	Pellets de Biomassa	Avaliar carvões provenientes da pirólise de alta temperatura de pellets de biomassa e Combustível Derivado de Resíduos (RDF) como adsorventes para captura de CO ₂ .	Pirólise de alta temperatura 800°C em reator de leito fixo (tempo curto: 10 min total). Carvão ativado quimicamente (KOH) e fisicamente (vapor).	O carvão de biomassa ativado quimicamente atingiu uma capacidade de sorção de 156.2 mg CO ₂ /g a 25 °C e 0.1 Mpa (1 bar). A máxima absorção foi observada após 2–3 min.
Zhou <i>et al.</i> (2024)	Biomassa lignocelulósica (acoplada com poliamidas residuais)	Sintetizar adsorventes enriquecidos com Nitrogênio (N) a partir de poliamidas residuais e biomassa lignocelulósica para captura de CO ₂ .	Síntese de materiais carbonáceos enriquecidos com N e ativação com KOH.	A presença de grupos funcionais contendo nitrogênio oferece sítios de adsorção eficazes para CO ₂ . A ativação por KOH aumentou a porosidade e o teor de oxigênio superficial.
Biti <i>et al.</i> (2023)	Celulose Microcristalina (MCC)	Producir carbonos ativados a partir de MCC com ativação física para captura sustentável de CO ₂ pós-combustão.	Carbonização (500 °C sob N ₂) para produzir biocarvão, seguida por ativação (A) a 600 °C usando CO ₂ para burn-offs (queima controlada) alvo (10%, 20% e 30%).	O AC com 30 wt% apresentou uma capacidade de adsorção de CO ₂ (1.58 mmol/g em 10 ciclos). O material manteve uma capacidade de captura estável por 10 ciclos.
De Souza <i>et al.</i> (2023)	Casca de Castanha-do-Pará (Brazil nut shells) (BS)	Producir carbono ativado microporoso usando ativação física (CO ₂) e química (KOH) para captura de CO ₂ .	Ativação química: Carbonização a 600, 700 ou 800 °C, seguida por ativação com KOH (razões 1:1 a 5:1) a 850 °C. Ativação física: ativação com CO ₂ por 1 a 6.5 horas.	O SBET aumentou de 1421 para 2730 m ² /g com o aumento da razão KOH/C. Todos os materiais ativados quimicamente tinham estrutura predominantemente microporosa (cerca de 93.4% a 98.8%).



Cruz Jr <i>et al.</i> (2022)	Casca de Cupuaçu (<i>Theobroma grandiflorum</i>) (resíduos agroflorestais)	Producir carbonos ativados microporosos a partir de resíduos agroflorestais (casca de cupuaçu) e avaliação para a captura de CO ₂ .	Pirólise a 500°C. Ativação química usando KOH.	O AC ativado quimicamente apresentou principalmente microporosidade (acima de 90% do volume total de poros). Carvões ativados com proporção 2:1 de KOH e temperatura de ativação de 700 °C apresentaram adsorção de CO ₂ a 1 bar de 7,8 e 4,4 mmol/g a 0 °C e 25 °C
Durán-Jiménez <i>et al.</i> (2022)	Nozes-peçã	Investigar os efeitos sinérgicos do acoplamento de aquecimento por micro-ondas e aquecimento convencional suave na preparação de carbonos ultra microporosos para captura de CO ₂ .	Aquecimento híbrido: convencional (600 °C) acoplado com micro-ondas (300 W). Testes de adsorção de CO ₂ a 25 °C e 1 bar.	O carbono híbrido (H-C60-MW8 - 600 °C, tempo: 60 min, potência de microondas: 300 W, tempo 8 min) alcançou a maior adsorção de CO ₂ (146 mg/g).
Kiełbasa <i>et al.</i> (2022)	Bagaço de Azeitona	Producir biocarvão ativado (quimicamente e fisicamente) a partir de bagaço de azeitona via tratamento termoquímico para adsorção e adsorção seletiva de CO ₂ em captura de gases de combustão.	Ativação em duas etapas: carbonização a 500 °C por 50 min, seguida por ativação a 600 °C usando vapor, K ₂ CO ₃ ou combinado. Adsorção de CO ₂ medida a 0 °C e 1 bar.	A adsorção de CO ₂ atingiu 3.15 mmol/g (PSC1) a 1 bar e 0 °C. Foi alcançada alta seletividade de CO ₂ sobre N ₂ na composição de 5% v/v CO ₂ e 75% v/v de N ₂ O. volume de poros pequenos (diâmetro menor ou igual a 0.79 nm) foi crucial para a adsorção de CO ₂ e a química da superfície não é listada como importante. Os valores de adsorção a 0,15 bar foram superiores a 50% da adsorção a 1 bar de pressão para todos os carvões ativados investigados



Moliner <i>et al.</i> (2022)	Resíduos de Óleo de Palma - <i>Empty fruit bunches</i> (EFB)/	Estudar as interações de fluxos de CO ₂ /N ₂ com camadas de grafite simulando novos adsorventes à base de carbono de EFB para captura de CO ₂ .	Carbonização a 650°C por 1h. Ativação com NaOH (hidróxido de sódio) 0.5M. Simulações de Dinâmica Molecular (LAMMPS) usando uma camada de grafite em fenda. Condições: T=300/400/500 K, P=1/5/10 atm, e porosidade 12/20/30 Angstrom.	Tamanhos de poros menores promoveram a adsorção de CO ₂ . A absorção de CO ₂ à temperatura ambiente para biocarvão fisicamente ativado (AC) foi de 2,4–3,6 mmolCO ₂ / gAC, enquanto a absorção média de CO ₂ para biocarvão quimicamente ativado foi de 3,36–3,80 mmolCO ₂ / gAC. O número de moléculas de CO ₂ retidas diminuiu em temperaturas altas e pressões mais baixas.
Durán-Jiménez <i>et al.</i> (2022)	Casca de Noz Pecã	Preparação simultânea de bioproductos (bio-óleo, bio-gás e biocarvão) via pirólise por micro-ondas.	Pirólise por micro-ondas (300 W ou 400 W, tempos variados). Análise da composição elementar e rendimentos de produtos.	O biocarvão (VII-N) apresentou alto teor de carbono (91.27%) e baixo H/C. A absorção de CO ₂ (2.5 mmol/g) foi alcançado pelo biocarvão preparado a 400 W e 6 min.
Ismail <i>et al.</i> (2022)	Bambu	Producir e caracterizar carbono ativado à base de bambu através de ativação com H ₃ PO ₄ em etapa única para captura de CO ₂ .	Carbonização a 500°C por 2h. Ativação em etapa única com H ₃ PO ₄ (50, 60, 70 wt%) a 500 °C por 120 min. Análise de adsorção de CO ₂ em alta pressão (0–30 bar) a 25 graus Celsius.	O AC produzido com 50 wt% de H ₃ PO ₄ (AC50) e capacidade de adsorção de CO ₂ : 1.45 mmol/g a 1 bar e 9.0 mmol/g a 30 bar (a 25 °C).
Kaya & Uzun (2021)	Pinha (<i>Pinus cone</i>)	Investigar a eficácia do biocarvão ativado com KOH para adsorção de corante Laranja de Metila (MO) e captura de CO ₂ .	Pirólise a 600 °C seguida de ativação química com KOH (razão 1/4) a 800 °C. Capacidade de retenção de CO ₂ medida por TGA.	A capacidade de adsorção de CO ₂ foi de 160 mg/g (3.64 mmol/g) a 25 °C. Biomassa com potencial de remoção de corante e de CO ₂ .



Liu <i>et al.</i> (2021)	Palha de Trigo	Investigar o desempenho de uma estratégia de multiprodutos (bioetanol, lignina e carbono de área de superfície ultra-alta - <i>ultra-high surface area carbon</i>) utilizando a plataforma de pré-tratamento PHP (ácido fosfórico com peróxido de hidrogênio).	Carbonização hidrotérmica a 200 °C por 2h e ativação a 700, 800 e 900 °C por 2h. Pré-tratamento PHP ($H_3PO_4 + H_2O_2$) a 40.2 °C. As frações solúveis em água foram usadas para produzir carbono ativado com KOH. Utilização de urvas isotérmicas de adsorção de CO ₂ a 25 °C.	O carbono de área de superfície ultra-alta (PHPK-700) alcançou uma capacidade de adsorção de CO ₂ superior de 4.61 mmol/g. O carbono PHPK-800 alcançou a maior área superficial (3291 m ² /g) e desempenho em supercapacitor (303.5 F/g).
Moliner <i>et al.</i> (2021)	Cachos e grãos vazios de frutas/ Resíduos de Óleo de Palma	Adsorventes otimizados obtidos de resíduos de óleo de palma.	Simulações de Dinâmica Molecular (MD) para estudar o efeito de temperatura, pressão e largura dos poros.	O número de moléculas de CO ₂ retidas diminuiu em temperaturas elevadas e pressões mais baixas e poros reduzidos promoveram a adsorção de CO ₂ nas pressões testadas.
Zhang <i>et al.</i> (2022)	Casca do Caroço de Palma (PKS)	Sintetizar espuma de carbono derivada de bio-resíduos (PKS-Lignin-P600) por processo de auto-espumação para captura de CO ₂ .	Carbonização hidrotérmica modificada (HTC) (adição de NaOH seguida de precipitação ácida com HCl) para obter PKS-Lignin, seguida de pirólise (600 °C sob N ₂).	PKS-Lignin-P600 exibiu uma macroestrutura 3D de espuma de carbono. A espuma de carbono derivada de resíduos biológicos apresentou absorção de CO ₂ 5,0 vezes maior e 4,8 vezes maior a 35 °C e 50 °C, respectivamente, em comparação com os resíduos biológicos puros.
Zubbri <i>et al.</i> (2021)	Casca de Rambutan (<i>Nephelium lappaceum</i>) (RP)	Desenvolver hidrocarvão ativado (HC) a partir da casca de rambutan como um bio-sorvente de baixo custo para a captura de CO ₂ em baixa temperatura.	Pirólise a 850 °C por 2h. Pré-tratamento de imersão em água seguido por carbonização hidrotérmica (HTC). Ativação química subsequente usando hidróxido de potássio (KOH).	O adsorvente otimizado apresentou a maior capacidade de adsorção de CO ₂ (122.37 mg/g a 30 °C e 1 atm).

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



4.1. Ativação química de biocarvões

Segundo Panwar e Pawar (2022), o biocarvão proveniente de biomassa e produzido por processos termoquímicos é frequentemente ativado ou modificado utilizando diferentes metodologias, responsáveis por alterar sua área superficial e estrutura de poros, além de formar grupos funcionais na superfície, aumentando sua aplicabilidade.

A ativação química ocorre quando o precursor carbonáceo reage com agentes químicos para gerar uma estrutura altamente porosa, o que favorece o processo de adsorção, nesse caso, do CO₂ (Sevilla *et al.*, 2021). O processo envolve a impregnação química do biocarvão na presença de reagentes desidratantes, normalmente matalas alcalinos-terrosos, como KOH (hidróxido de potássio) (Panwar e Pawar, 2022). Esse tipo de ativação ocorre em altas temperaturas para promover a formação de poros através de mecanismos de desidratação e oxidação. A metodologia é adotada nos estudos de Cruz Jr. *et al.* (2022), Souza *et al.* (2023), Kaya e Uzun (2021), Durán-Jiménez *et al.* (2022), Zubri *et al.* (2021), Liu *et al.* (2021) e Jerzak *et al.* (2024), que utilizaram hidróxido de potássio, descrito por Souza *et al.* (2023) como o agente químico mais comumente empregado, em função do grande volume de poros centralizado na região dos microporos, que resultam em alta área superficial.

É percebido que a ativação química é um processo amplamente utilizado em função dos favorecimentos que impõem a estrutura de poros. De forma geral, agentes químicos comumente utilizados incluem álcalis fortes (como KOH e NaOH) e ácidos (como H₃PO₄) (Sajjadi *et al.*, 2019). O NaOH é utilizado por Moliner *et al.* (2022), que relatam que amostras com maiores taxas de impregnação (concentração) de NaOH também apresentam uma maior absorção de CO₂. Em relação ao H₃PO₄ (ácido fosfórico), utilizado por Ismail *et al.* (2022) e Liu *et al.* (2021), é relatado desempenho de duas funções durante a ativação: atuação como catalisador ácido, que promove a clivagem das ligações, e atuação como reagente para a formação de ligações cruzadas. O H₃PO₄ é considerado favorável em alguns casos por não gerar poluição ambiental em comparação com outros agentes ativadores, e por exigir uma temperatura de ativação mais baixa do que bases fortes como KOH ou NaOH (Ismail *et al.*, 2022). Já o carbonato de potássio K₂CO₃, é um agente ativador de baixo custo e menos corrosivo, utilizado por Kiełbasa *et al.* (2022).

4.2 Ativação física de biocarvões

A ativação física é um procedimento convencional que oferece uma opção menos agressiva ambientalmente em comparação com a ativação química, pois evita o descarte de agentes corrosivos ou tóxicos no meio ambiente, o que é um importante fator principalmente pensando em aplicabilidades em larga escala (Biti *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2020). Apesar disso, a ativação química apresenta maior frequência na literatura, por apresentar capacidade adsorptiva maior. Ambas as ativações são investigadas em conjunto em alguns estudos, como em Ahmadpour (1996), Maciá-Agulló *et al.* (2004) e Denmark *et al.* (2024) e combinada em Kiełbasa e colaboradores (2022).



O processo de Ativação Física envolve carbonização, onde a biomassa é convertida em biocarvão por desidratação e a ativação que ocorre em altas temperaturas (frequentemente acima de 850 °C) na presença de agentes oxidantes gasosos, como vapor (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) ou ar (Sajjadi *et al.*, 2019).

Durante a ativação, esses agentes gasosos são alimentados à amostra e se difundem na superfície e nos poros do biocarvão. Ao reagir com as estruturas carbonáceas (gaseificação), formam-se produtos gasosos adicionais. Isso aprimora as propriedades texturais preliminares desenvolvidas após a carbonização (Rashidi e Yusup, 2016). Embora seja um processo menos agressivo ambientalmente e de baixo custo associado, a ativação física apresenta desvantagens relacionadas ao alto consumo de energia, baixo rendimento de carbono, além de poros menos eficientes em adsorção quando comparados com o biocarvão ativado quimicamente (Gao *et al.*, 2020). É válido ressaltar que carvões ativados podem ser regenerados, o que contribui para aplicações em larga escala e economia circular (Moliner *et al.*, 2021). A ativação física é relatada em Moliner *et al.* (2021), Biti *et al.* (2023) e Kietbasa *et al.* (2022) e em ambos os trabalhos são avaliados o melhoramento da estrutura microporosa.

4.3 Avaliações de outra natureza

Moliner e colaboradores (2021), realizaram estudos de simulação por Dinâmica Molecular (MD) ou Monte Carlo (MC). Contextualizando os termos, segundo a IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), a “dinâmica molecular é um procedimento de simulação que consiste na computação do movimento dos átomos em uma molécula ou de átomos individuais ou moléculas em sólidos, líquidos e gases, de acordo com as leis de movimento de Newton” (PAC, 1997). Enquanto o método de Monte Carlo “em matemática, é um método originalmente usado para calcular integrais múltiplas por meio de uma amostra aleatória. O método é usado para modelagem numérica de sistemas químicos de múltiplas partículas, em particular líquidos; baseia-se na teoria da mecânica estatística de equilíbrio”. O trabalho envolveu a modelagem e simulação computacional das interações moleculares, estudando a interação dos fluxos de dióxido de carbono com camada de grafite utilizando MD. Nesse caso, o estudo objetivou estudar os efeitos da largura e geometria dos poros no sequestro de carbono e obteve resultados favoráveis. Além disso, os resultados demonstraram que o número de moléculas de CO_2 retidas na estrutura de grafite diminui em temperaturas mais e em pressões mais baixas, o que concorda com a natureza exotérmica da adsorção.

Durán-Jiménez e colaboradores (2022), em estudo complementar, analisam a pirólise por micro-ondas, tecnologia descrita como atrativa para a valorização da biomassa. Nesse processo, não são gerados resíduos corrosivos e foram observadas contribuições no processo de adsorção. De acordo com Cavallaro (2025), as micro-ondas, que correspondem à faixa do espectro eletromagnético entre 300 MHz e 30 GHz, são uma tecnologia atual para a realização da pirólise de biomassas, objetivando a obtenção de produtos como o biocarvão. O processo é eficiente e simples operacionalmente e, no âmbito da porosidade, a penetração eletromagnética distribui-se uniformemente no interior da partícula. Pirólise assistida por



micro-ondas também avaliadas em Baytar *et al.* (2018), Ahmed e Theydan (2014) e Li *et al.* (2021). Em Zhang *et al.* (2022) é descrita a síntese de espuma de carbono através do processo de carbonização hidrotérmica modificada (HTC). O material apresentou macroporos, mesoporos e microporos e potencial de aplicação à descarbonização, consideravelmente superior quando comparado a resíduos biológicos puros.

4.4 Efeito de pressão e temperatura

A temperatura é fator de influência no processo de pirólise, nas taxas de aquecimento (°C/min), na capacidade de adsorção e na ativação. Nos artigos contidos na revisão sistemática, sua influência é comumente empregada no caso da capacidade de adsorção dado o incremento de temperatura e na influência da ativação.

A adsorção de CO₂ em carvões ativados é relatada como um processo predominantemente de fisissorção (Moliner *et al.*, 2021; Biti *et al.*, 2023; Moliner *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). E, em contexto geral, é observado que a capacidade de adsorção é reduzida com o aumento de temperatura (Moliner *et al.*, 2021; Biti *et al.*, 2023; Zubbri *et al.*, 2021).

Em relação à temperatura de ativação, este é um dos principais parâmetros na determinação das propriedades finais do adsorvente (Kiełbasa *et al.*, 2022). Contudo, a temperatura demonstra um limite de contribuição. Liu *et al.* (2021) e Zubbri *et al.* (2021) observam que em altas temperaturas há a redução da área superficial e do volume dos poros, o que demonstra que houve degradação térmica do biomaterial. Mas, em geral, a alta temperatura contribui com as ativações.

Já na análise por termogravimetria, o aumento da taxa de aquecimento durante a pirólise resultou em uma correlação positiva com a massa final do carvão (Jezak *et al.*, 2024). Apesar disso, não são avaliados a influência da temperatura de pirólise enquanto foco dos trabalhos, mas sabe-se que é fator de influência (Albalasmeh *et al.*, 2020).

Em relação a pressão, outro fator operacional extremamente importante na determinação da capacidade de adsorção, o aumento contribui na concentração de dióxido de carbono adsorvido em todos os estudos que avaliam o parâmetro. De acordo com Moliner *et al.* (2021), os resultados da simulação computacional MD confirmaram que o número de moléculas retidas reduz em pressões mais baixas. Os autores ainda afirmam que efeito da pressão sobre a capacidade de adsorção de CO₂ foi mais evidente do que o efeito da variação da temperatura.

5 CONCLUSÃO

A utilização de resíduos de biomassa é uma importante prática a ser investigada, especialmente quando aliada aos objetivos do desenvolvimento sustentável. À vista disso, torna-se imprescindível a busca por metodologias eficientes e que contribuam integralmente para o desenvolvimento sustentável, avaliando os impactos associados ao processo em toda sua cadeia de produção e utilização. O Brasil por ser um país com dimensões continentais e com



regiões com características de consumo e produção tão diversas possui um potencial vasto na área.

A avaliação de biocarvões, nesse caso de biomassa lignocelulósica, para remoção de dióxido de carbono (CO_2) é crucial no contexto das mudanças climáticas, uma vez que esses materiais podem contribuir como uma solução eficiente para a captura de carbono. Com isso, avaliar sua eficácia é necessário para garantir que o insumo seja uma estratégia viável e sustentável, otimizando seus benefícios ambientais e econômicos.



REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AHMADPOUR, A.; DO, D. D. The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation. *Carbon*, v. 34, n. 4, p. 471-479, 1996.

AHMED, M. J.; THEYDAN, S. K. Fluoroquinolones antibiotics adsorption onto microporous activated carbon from lignocellulosic biomass by microwave pyrolysis. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 45, n. 1, p. 219-226, 2014.

BAYTAR, O.; ŞAHİN, Ö.; SAKA, C. Sequential application of microwave and conventional heating methods for preparation of activated carbon from biomass and its methylene blue adsorption. *Applied Thermal Engineering*, v. 138, p. 542-551, 2018.

BITI, S. et al. Sustainable microcrystalline cellulose-based activated carbons for a greener carbon capture at post-combustion conditions. *International journal of greenhouse gas control*, v. 125, p. 103876, 2023.

CAVALLARO, R. J. **Estudo da Pirólise Assistida por Micro-ondas de Biomassas Alternativas Provenientes do Cerrado Brasileiro**. Tese (doutorado em Engenharia Química). Uberlândia, Minas Gerais, 2025.

CRUZ, P. M. et al. Perspectiva transnacional da sustentabilidade e a nova matriz energética global. *Pensar-Revista de Ciências Jurídicas*, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2023.

CRUZ JR, Orlando F. et al. Enhanced CO₂ capture by cupuassu shell-derived activated carbon with high microporous volume. *Carbon Letters*, v. 33, n. 3, p. 727-735, 2023.

DENMARK, I. et al. Comparative Study of Chemical Activation and Physical Activation Approach to Optimize Biomass-Based Doped Carbons for Energy Applications. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, v. 13, n. 6, p. 061003, 2024.

DE SOUZA, L. C. **Resposta do biocarvão nos atributos e na emissão de gases do solo**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural da Amazônia.

DE SOUZA, L. K. C et al. CO₂ capture by microporous carbon based on Brazil nut shells. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 38, p. 89114-89122, 2023.

DOS SANTOS, A. L. M. et al. Biochar: aplicações na remediação ambiental e no sequestro de carbono. *Microbiologia e Biotecnologia ambiental in foco Volume 2*, v. 7566, p. 92.

DURÁN-JIMÉNEZ, G. et al. Green and simple approach for low-cost bioproducts preparation and CO₂ capture. *Chemosphere*, v. 279, p. 130512, 2021.

DURÁN-JIMÉNEZ, G. et al. Simultaneous conventional and microwave heating for the synthesis of adsorbents for CO₂ capture: comparative study to pristine technologies. *Chemical Engineering Journal*, v. 438, p. 135549, 2022.

GAO, Y. et al. Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review. *Science of the Total Environment*, v. 746, p. 141094, 2020.

ISMAIL, I. S.; RASHIDI, N. A.; YUSUP, S. Production and characterization of bamboo-based activated carbon through single-step H₃PO₄ activation for CO₂ capture. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 9, p. 12434-12440, 2022.

JAYAKUMAR, M. et al. Comprehensive review on lignocellulosic biomass derived biochar production, characterization, utilization and applications. *Chemosphere*, v. 345, p. 140515, 2023.

JERZAK, W. et al. Potential of products from high-temperature pyrolysis of biomass and refuse-derived fuel pellets. *Biomass and Bioenergy*, v. 183, p. 107159, 2024.



JIBRIL, Baba et al. Effects of H_3PO_4 and KOH in carbonization of lignocellulosic material. **Journal of Analytical and applied pyrolysis**, v. 83, n. 2, p. 151-156, 2008.

KAYA, N.; UZUN, Z. Y. Investigation of effectiveness of pine cone biochar activated with KOH for methyl orange adsorption and CO₂ capture. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 11, n. 3, p. 1067-1083, 2021.

KIEŁBASA, K. et al. Thermochemical conversion of lignocellulosic biomass-olive pomace-into activated biocarbon for CO₂ adsorption. **Industrial Crops and Products**, v. 187, p. 115416, 2022.

LI, Ying et al. Adsorption of elemental mercury in flue gas using biomass porous carbons modified by microwave/hydrogen peroxide. **Fuel**, v. 291, p. 120152, 2021.

LIU, N. et al. Characterization of biochars derived from agriculture wastes and their adsorptive removal of atrazine from aqueous solution: A comparative study. **Bioresource technology**, v. 198, p. 55-62, 2015.

LIU, Z. et al. Performances of a multi-product strategy for bioethanol, lignin, and ultra-high surface area carbon from lignocellulose by PHP (phosphoric acid plus hydrogen peroxide) pretreatment platform. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111503, 2021.

MACIÁ-AGULLÓ, J. A. et al. Activation of coal tar pitch carbon fibres: Physical activation vs. chemical activation. **Carbon**, v. 42, n. 7, p. 1367-1370, 2004.

MENONCIN, M. et al. biomassa como matéria-prima renovável: obstáculos para utilização: biomass as a renewable raw material: obstacles to its use. **Mix Sustentável**, v. 9, n. 5, p. 125-139, 2023.

MOLINER, C. et al. Production, Activation and CO₂ Uptake Capacity of a Carbonaceous Microporous Material from Palm Oil Residues. **Energies** 2022, 15, 9160.

MOLINER, Cristina et al. Molecular dynamics simulation of the interactions between carbon dioxide and a natural-based carbonaceous microporous material. **Chemical Engineering Transactions**, v. 86, p. 1111-1116, 2021.

Monte Carlo method' in IUPAC Compendium of Chemical Terminology, 5th ed. International Union of Pure and Applied Chemistry; 2025. Online version 5.0.0, 2025. <https://doi.org/10.1351/goldbook.MT07072>.

OLIVEIRA, Gisela et al. O que significa descarbonizar? Uma visão da sociedade atual sem energia fóssil. **Sustentabilidade e Descarbonização—desafios práticos**, p. 9-27, 2020.

PAC, 1997, 69, 1137. (Glossary of terms used in computational drug design (IUPAC Recommendations 1997)) on page 1146

Page MJ, et al. BMJ 2021;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71.

PANWAR, N. L.; PAWAR, Ashish. Influence of activation conditions on the physicochemical properties of activated biochar: A review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 3, p. 925-947, 2022.

RASHIDI, N.A., YUSUP, S., 2016. An overview of activated carbons utilization for the postcombustion carbon dioxide capture. **J. CO₂ Utilization**. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.11.002>

RIBEIRO A. P. A. L.; LOPES, K. C. Carvão ativado de endocarpo de macaúba (*Acrocomia aculeata*) para adsorção de CO₂ emitido pela queima do bagaço da cana-de-açúcar1. 2022. **Processos Químicos e Biotecnológicos Volume 9**, p. 6.

ROBINSON, A. L. dos S.; SOBRINHO, V. G. Os Efeitos de encadeamentos na bioeconomia e na economia de baixo carbono do Brasil. **Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 35, n. 2, p. 0076-94, 2022.

SAJJADI, B.; Chen, W.-Y.; EGIEBOR, N.O. A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications. **Rev. Chem. Eng.** 2019, 35, 735–776

SAJJADI, Baharak et al. Chemical activation of biochar for energy and environmental applications: a comprehensive review. **Reviews in Chemical Engineering**, v. 35, n. 7, p. 777-815, 2019.



SEVILLA, M.; DÍEZ, N.; FUERTES, A. B. More sustainable chemical activation strategies for the production of porous carbons. **ChemSusChem**, v. 14, n. 1, p. 94-117, 2021.

SILVA, H. D. M. et al. Produção e caracterização do biocarvão obtido de palha de cana-de-açúcar. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 4, p. e20230218, 2023.

SILVA, D. H. C.; RIBEIRO, J. de O. N.; ALVAREZ, C. E. C. potencial do biochar para uso em upgrading do biogás: uma revisão. **REVISTA FOCO**, v. 18, n. 5, p. e8634-e8634, 2025.

ZHANG, B.; JIANG, Y.; BALASUBRAMANIAN, R. Synthesis of biowaste-derived carbon foam for CO₂ capture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 185, p. 106453, 2022.

ZHOU, S. et al. Development and CO₂ capture of nitrogen-enriched microporous carbon by coupling waste polyamides with lignocellulosic biomass. **Journal of Environmental Management**, v. 369, p. 122384, 2024.

ZOU, R. et al. Biochar: From by-products of agro-industrial lignocellulosic waste to tailored carbon-based catalysts for biomass thermochemical conversions. **Chemical Engineering Journal**, v. 441, p. 135972, 2022.

ZUBBRI, Nurul Azrin et al. Low temperature CO₂ capture on biomass-derived KOH-activated hydrochar established through hydrothermal carbonization with water-soaking pre-treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 105074, 2021.



DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** A ideia central do trabalho, bem como a organização dos tópicos a serem abordados foi de Naiara Lima Costa, doutoranda que avalia biomassas lignocelulósicas em seu projeto.
- **Curadoria de Dados:** Os dados foram organizados e verificados por todos os autores.
- **Análise Formal:** A metodologia PRISMA foi inicialmente realizada por Naiara, que dividiu os artigos entre todos os autores. Cada artigo foi revisado por pelo menos duas pessoas.
- **Aquisição de Financiamento:** Não houve recursos financeiros envolvidos.
- **Investigação:** A coleta de dados na plataforma foi conduzida inicialmente por Naiara e replicada pelos demais autores para verificação. Posteriormente a seleção dos artigos avaliados também foi realizada por todos os autores.
- **Metodologia:** A metodologia foi feita em colaboração entre os autores.
- **Redação - Rascunho Inicial:** A primeira versão do manuscrito, organizado no template, foi escrita por Naiara Lima Costa.
- **Redação - Revisão Crítica:** A revisão foi feita por todos os autores.
- **Revisão e Edição Final:** A revisão foi feita por todos os autores.
- **Supervisão:** A supervisão foi feita por Michael Jones da Silva.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, Naiara Lima Costa, Júnior da Silva Camargo, Dener da Silva Souza e Michael Jones da Silva declaramos que o manuscrito intitulado "Potencial de biomassas lignocelulósicas aplicadas à captura de Dióxido de Carbono(CO₂): uma revisão sistemática da literatura":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui/possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho
2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
3. **Conflitos Pessoais:** Não possui/possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.



Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes

Technical and Scientific Journal Green Cities

ISSN 2317-8604 Suporte Online / Online Support

Edição em Português e Inglês / Edition in Portuguese and English - Vol. 13, N. 49, 2025