



Valorização de resíduos agroindustriais por meio da síntese de adsorventes porosos para captura de CO₂

Ingrid Selbach Pinto^{1,2}; Leonardo Moreira dos Santos²; Franciele Longaray Bernard^{1,2};

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Porto Alegre, Brasil;

² Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Porto Alegre, Brasil; Ingrid.pinto@edu.pucrs.br

Palavras-Chave: Adsorção, Porosidade, Dióxido de carbono.

Introdução

A poluição ambiental é definida como a introdução de substâncias, energia ou agentes físicos, químicos e biológicos nocivos ao meio ambiente. Alterando o equilíbrio natural dos ecossistemas, prejudicando a segurança, bem estar e a saúde de seres vivos, decorrente principalmente de atividades humanas (LANDRIGAN *et al.*, 2018; SINGH; PAYRA; VERMA, 2023).

A poluição ambiental ocorre devido a rápida industrialização, urbanização, exploração, expansão populacional, mineração e a adoção de novas tecnologias, o que leva a geração de subprodutos e efluentes tóxicos. As principais causas de contaminação ambiental estão diretamente relacionadas a poluição do ar, da água e do solo, devido a diferentes tipos de poluentes. Sendo os principais fatores: contaminação do ar, água e solo, poluentes gasosos, metais tóxicos, queima de combustíveis fósseis, material particulado, efluentes industriais, escoamento agrícola e resíduos eletrônicos em corpos d'água (KUMARI *et al.*, 2025).

Relata-se que o uso contínuo de combustíveis fósseis será responsável por 50% das emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2030. Além das questões ambientais, problemas de saúde se intensificaram drasticamente nas últimas décadas, o que torna ainda mais importante o desenvolvimento de materiais sustentáveis para mitigação dos problemas ambientais e de saúde humana (ROY; YADAV; AHMARUZZAMAN, 2024; YAMEEN *et al.*, 2024).

No período de um ano, houve um aumento de 1,69 ppm de CO₂ emitidos na atmosfera entre 2025 e 2026 (LABORATORY), destacando que a queima de combustíveis fósseis se torna cada vez mais preocupante, tornando as mudanças climáticas a maior ameaça que a humanidade enfrenta (OMS).

Além da utilização contínua de reserva de combustíveis fósseis, o descarte inadequado de resíduos sólidos é outro fator principal de poluição, liberando subprodutos tóxicos e nocivos ao meio ambiente. Dentre variados tipos de resíduos sólidos, o descarte de resíduos agroindustriais é uma preocupação, devido a expansão exponencial das indústrias alimentícias, resultante do crescimento populacional. Tais resíduos incluem biomassa residual, cascas,



películas, sementes e outras partes de resíduos agrícolas sólidos (OBENG *et al.*, 2020; SAEED *et al.*, 2023).

No presente trabalho foi escolhido dois resíduos agroindustriais para fins de se obter adsorventes porosos com afinidade para captura de CO₂, sendo eles a borra de café, que gera anualmente em torno de 1,1 milhão de toneladas ao ano e o bagaço de malte que gera em torno de 20 kg de bagaço de malte a cada 100 L de cerveja produzida (“Borra de café: como a biotecnologia pode aproveitar esse resíduo”, [S.d.]; SILVEIRA NETO *et al.*, 2023). Os resíduos foram submetidos a tratamentos químicos e térmicos para obtenção dos adsorventes porosos. Os materiais obtidos foram caracterizados por FTIR-UATR, TGA e BET e avaliados quanto à capacidade de sorção de CO₂ a 25 °C em diferentes pressões.

Material e Métodos

No presente trabalho foi utilizado como material de partida a borra de café e o bagaço de malte. Para tratamento desses materiais foi utilizado carbonato de potássio (K₂CO₃) e hidróxido de potássio (KOH).

A borra de café (BC), foi levada a estufa por 12h a 105°C para retirada de umidade, em seguida foi adicionado K₂CO₃ em proporção 1:1 para fins de ativação do material e a mistura foi levada a calcinação em mufla a 800°C. Após a calcinação, o material foi submetido a um tratamento básico utilizando KOH na proporção de 1:6, em um reator, e posteriormente levado a estufa a 150°C durante 90min. Após o tratamento o material foi lavado para neutralização do pH e, por fim foi seco em estufa a 10°C por 12h.

O bagaço de malte (BM), foi lavado e seco em estufa por 12h a 105°C, em seguida foi adicionado K₂CO₃ em proporção 1:1 para fins de ativação do material e a mistura foi levada a calcinação em mufla a 800°C. Após a calcinação o material foi submetido a um tratamento básico utilizando KOH na proporção de 1:6, em um reator e, posteriormente levado a estufa a 150°C durante 90min. Por fim, após o tratamento material foi lavado para neutralização do pH e submetido a secagem em estufa a 10°C por 12h.

A caracterização dos materiais obtidos ocorreu através das análises de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier com Reflexão Total Atenuada Universal (FTIR-UATR), Análise Termogravimétrica (TGA), Método de Brunauer-Emmett-Teller (BET) e avaliação da capacidade de Sorção de CO₂ do material a 25°C e pressões de equilíbrio de 1 e 30 bar usando o método de decaimento de pressão.

Resultados e Discussão

1. Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)



A Figura 1 apresenta os espectros da análise de infravermelho dos materiais obtidos a partir dos resíduos do malte e da borra de café. As bandas apresentadas no espectro da amostra de malte se mostraram condizentes com os materiais obtidos por Gutkoski, et al., e por Machado, et al., demonstrando que os materiais são compostos majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina. Para o malte, a banda em $\sim 3378\text{ cm}^{-1}$ correspondente ao estiramento O-H dos grupos hidroxila presentes na celulose e na hemicelulose, bem como aos grupos hidroxila fenólicos presentes na estrutura da lignina. Em $\sim 1742\text{ cm}^{-1}$ observa-se o estiramento C=O da estrutura de hemicelulose, enquanto o sinal em $\sim 1653\text{ cm}^{-1}$ corresponde ao estiramento C=O relacionado com a estrutura da lignina. As bandas em $\sim 1380\text{ cm}^{-1}$ podem ser atribuídas às deformações C-H de $-\text{CH}_2$ e $-\text{CH}_3$, as quais confirmam a presença de hemicelulose e celulose. Bandas próximas a $\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ devem-se ao estiramento de ligações C-O (hidroxilas da celulose e hemicelulose). Por fim, os sinais na faixa de $\sim 603\text{ cm}^{-1}$ são atribuídos ao estiramento das ligações C-C de anéis aromáticos (GUTKOSKI *et al.*, 2026; MACHADO *et al.*, 2020).

As bandas apresentadas no espectro obtido da amostra de borra de café se mostraram condizentes com os espectros obtidos por Silvaraja, et al., demonstrando que o material é composto majoritariamente de carboidratos e fibras, como celulose, hemicelulose e ligninas, onde em $\sim 3379\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 3651\text{ cm}^{-1}$ correspondem ao estiramento das ligações O-H. As bandas em $\sim 2816\text{ cm}^{-1}$ e $\sim 2896\text{ cm}^{-1}$ correspondem à vibração de estiramento das ligações C-H dos grupos CH_2 . Ligações aromáticas C-C são apresentadas em $\sim 1543\text{ cm}^{-1}$, enquanto a banda em $\sim 1184\text{ cm}^{-1}$ é atribuída ao C-O e o sinal em $\sim 861\text{ cm}^{-1}$ é atribuído ao C-H aromático (SILVARAJA *et al.*, 2025).

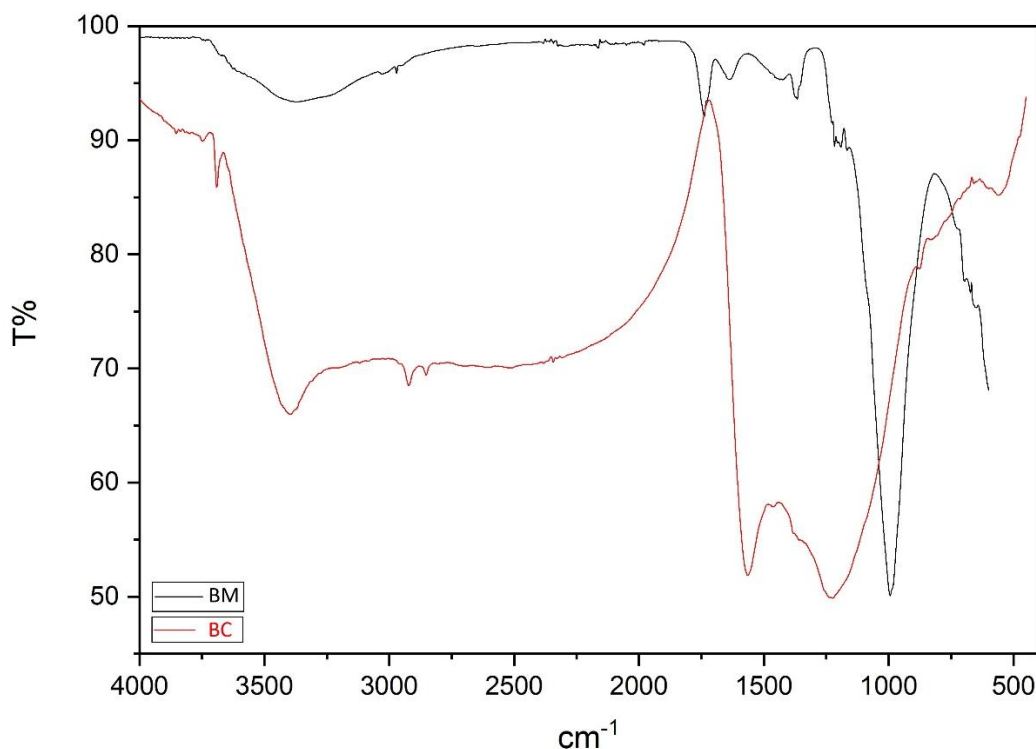


Figura 1. Espectros de infravermelho

2. Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 2 apresenta os resultados de análise termogravimétrica dos materiais obtidos, onde no material obtido a partir do malte, observa-se uma perda de massa em aproximadamente 100°C atribuída a remoção de umidade do material, a perda de massa entre 200 e 400°C é atribuída a decomposição térmica da hemicelulose e da celulose e a terceira degradação térmica em torno de 600°C é associada a decomposição térmica da lignina, A curva de degradação obtida se apresentou semelhante a encontrada por Silva, et al., (DOS SANTOS SILVA *et al.*, 2024).

Já no material oriundo da borra de café observou-se uma curva de degradação semelhante as descritas na literatura onde o material apresenta em torno de três estágios de degradação. O primeiro decaimento de massa até 120°C é relacionado a vaporização de umidade. Os decaimentos de massa entre 300 e 530°C, são relacionados a decomposição térmica da hemicelulose e da celulose (HIDAYAT *et al.*, 2025; LIN *et al.*, 2025; MALAGÓN-ROMERO *et al.*, 2023).

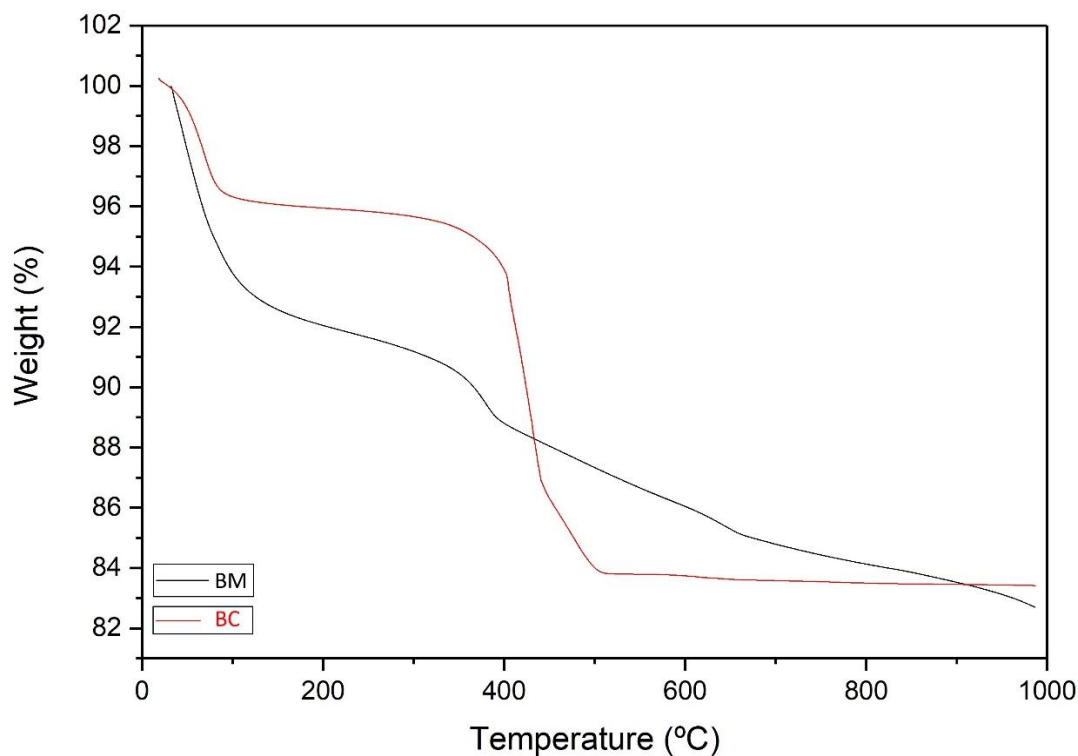


Figura 2. Termogramas dos materiais sintetizados.

3. Método Brunauer-Emmet-Teller (BET)

No Quadro 1 estão apresentados os valores de área superficial, volume de poro, e densidade dos materiais obtidos. O material oriundo da borra de café apresentou área superficial semelhante ao descrito na literatura, onde o material foi obtido a 600°C durante 1h. Já o material proveniente do bagaço de malte apresentou área superficial superior ao descrito na literatura ($6.51 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) entretanto, os dois materiais apresentaram possuir microporos conforme definido pela IUPAC (DOS SANTOS SILVA *et al.*, 2024; KIM *et al.*, 2020; MACHADO *et al.*, 2020; “mesopore”, 2014).

Quadro 1. Análise de BET e densidade.

Amostra	BET	Volume de Poro	Raio Médio de Poro	Densidade
BM	69	0,094	1,90	3,002
BC	685	0,134	1,52	1,909

4. Sorção de CO₂

A figura 3 apresenta a capacidade de captura de CO₂ dos materiais sintetizados a 25°C e em duas pressões (1 e 30 bar). O material que apresentou melhor capacidade de sorção foi o material partindo da borra de café, o que pode estar relacionado a maior área superficial e

volume de poro do material. Quando comparado aos resultados de Soltysik, et al., em baixa pressão (1 bar a 25°C), onde obtiveram 123.6 mg CO₂/g, o presente trabalho apresentou dados próximos ao descritos, alcançando 108.09 mg CO₂/g nas mesmas condições. Já em alta pressão (30 bar a 25°C) o material apresentou mais que o dobro da capacidade de captura de CO₂ (SOLTYSIK; MAJCHRZAK-KUCEBA; WAWRZYŃCZAK, 2025).

Já o material sintetizado partindo do bagaço de malte quando comparado ao material da borra de café, demonstrou capacidade inferior de captura de CO₂, o que pode estar diretamente relacionado a sua menor área superficial e volume de poro. Quando comparado a dados obtidos por Carlos, et al., onde obtiveram uma capacidade de captura de 68.66 mg CO₂/g a 1 bar e 25°C, utilizando um material partindo do bagaço de malte, os dados do presente trabalho se demonstraram ligeiramente inferiores, mas quando submetido a pressão de equilíbrio de 30 bar o material apresentou o dobro da capacidade de captura de CO₂ (CARLOS *et al.*, 2026).

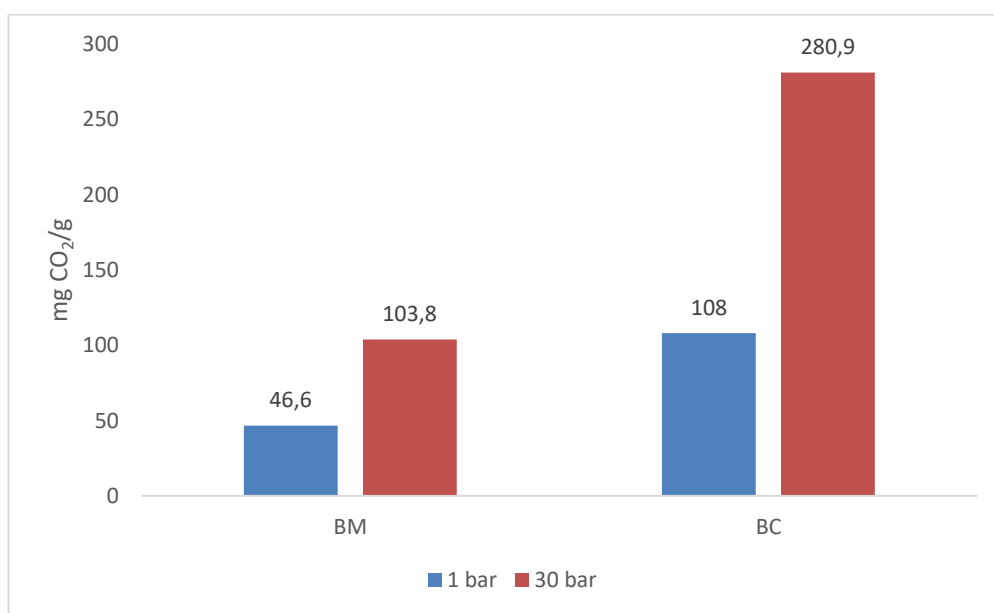


Figura 3. Capacidade de sorção dos materiais.

Conclusões

Os resultados obtidos no presente trabalho demonstraram a viabilidade da utilização da borra de café e do bagaço de malte como matéria prima para a produção de materiais porosos destinados a captura de CO₂.

As análises de FTIR e TGA evidenciaram que os dois materiais possuem origem lignocelulósica e estabilidade frente aos tratamentos empregados. Através da análise de BET foi confirmado a formação de estruturas microporosas, com áreas superficiais de 685 m²g⁻¹ para o material derivado de borra de café e 69 m²g⁻¹ para o material proveniente do bagaço de malte. A maior área superficial e maior volume de poros apresentado pelo material obtido da borra de café refletiriam diretamente no desempenho do material na sorção de CO₂, atingindo



capacidades de 108.0 e 280.9 mg CO₂/g a pressões de equilíbrio de 1 e 30 bar, respectivamente. O material derivado do bagaço de malte apresentou capacidades de 46.6 e 103.8 mg CO₂/g nas mesmas condições, demonstrando também potencial para aplicação na captura de CO₂.

Desta forma, conclui-se que ambos os resíduos apresentaram potencial para serem valorizados na produção de materiais adsorventes, destacando-se a borra de café pelo superior desempenho na captura de CO₂. Os resultados reforçam a possibilidade de associar a valorização de resíduos agroindustriais ao desenvolvimento de materiais funcionais para mitigação de emissões de CO₂, contribuindo para estratégias de aproveitamento de resíduos e para uma abordagem mais sustentável no tratamento de gases de efeito estufa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de pesquisa, a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e a Cervejaria Steinlen Berg pelo material fornecido.

Referências

- Borra de café: como a biotecnologia pode aproveitar esse resíduo. Disponível em: <<https://profissaobiotech.com.br/borra-de-cafe-como-biotecnologia-pode-aproveitar-esse-residuo/>>.
- CARLOS, Giovanna C. *et al.* Optimization of chemically activated carbon derived from malt bagasse for CO₂ adsorption: a simplex-centroid approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 33, n. 9, p. 3962–3981, 27 fev. 2026. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s11356-026-37557-7>>.
- DOS SANTOS SILVA, Aline Aparecida *et al.* Biochar from malt residue: Toward a circular economy for sustainable fluoroquinolone removal in aqueous systems. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 183, p. 106707, out. 2024. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237024003620>>.
- GUTKOSKI, Júlia Pedó *et al.* Brewery-waste biochar for antibiotic removal: Modeling, BAC column enhancement, and microbial analysis. **Process Biochemistry**, v. 168, p. 291–305, set. 2026. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359511326001662>>.
- HIDAYAT, Endar *et al.* Optimization and comparative modelling of RSM and ANN for the adsorptive removal of Remazol Brilliant Blue R dye using spent coffee ground biochar. **Chemosphere**, v. 389, p. 144709, nov. 2025. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653525006575>>.
- KIM, Min-Jeong *et al.* Simple synthesis of spent coffee ground-based microporous carbons using K₂CO₃ as an activation agent and their application to CO₂ capture. **Chemical Engineering Journal**, v. 397, p. 125404, out. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894720313966>>.
- KUMARI, Suman *et al.* Valorization of agricultural waste for wastewater treatment: A sustainable approach to environmental clean-up. **Next Research**, v. 2, n. 3, p. 100590, set. 2025. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S3050475925004592>>.
- LABORATORY, Global Monitoring. **Global Monitoring Laboratory**. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>>.
- LANDRIGAN, Philip J *et al.* The Lancet Commission on pollution and health. **The Lancet**,



v. 391, n. 10119, p. 462–512, fev. 2018. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140673617323450>>.

LIN, Jia-Yin *et al.* Sustainable Bio-Adsorbent Generated from Coffee Waste for Dual Application in Heavy Metal and Dye Removal. **Processes**, v. 13, n. 5, p. 1364, 29 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/13/5/1364>>.

MACHADO, Lauren M.M. *et al.* Simultaneous production of mesoporous biochar and palmitic acid by pyrolysis of brewing industry wastes. **Waste Management**, v. 113, p. 96–104, jul. 2020. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X20302786>>.

MALAGÓN-ROMERO, Dionisio *et al.* Pyrolysis of Colombian spent coffee grounds (SCGs), characterization of bio-oil, and study of its antioxidant properties. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 42, n. 1, p. 811–829, 14 dez. 2023. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786451.2023.2235025>>.

mesopore. **The IUPAC Compendium of Chemical Terminology**. Research Triangle Park, NC: International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), 2014. . Disponível em:

<<https://goldbook.iupac.org/terms/view/M03853>>.

OBENG, George Yaw *et al.* Coconut Wastes as Bioresource for Sustainable Energy: Quantifying Wastes, Calorific Values and Emissions in Ghana. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2178, 1 maio 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/9/2178>>.

OMS. Mudanças climáticas são a maior ameaça à saúde humana, afirma OMS.

ROY, Saptarshi; YADAV, Gaurav; AHMARUZZAMAN, Md. Engineering of metal-organic framework functionalized by Fe(III) exchanged keggin unit for microwave-assisted sustainable production of biodiesel: Kinetics, thermodynamics, mechanistic insights and life-cycle cost analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 313, p. 118625, ago. 2024.

Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890424005661>>.

SAEED, Mohd *et al.* Coconut waste valorization to produce biochar catalyst and its application in cellulose-degrading enzymes production via SSF. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 240, p. 124382, jun. 2023. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014181302301276X>>.

SILVARAJA, Jayaraja *et al.* Preliminary investigations of sustainable magnetic catalyst-based biochar derived spent coffee ground for biodiesel production from waste cooking oil. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 11, p. 100148, dez. 2025. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772782325000038>>.

SILVEIRA NETO, Angelo Luiz *et al.* Application of a biochar produced from malt bagasse as a residue of brewery industry in fixed-bed column adsorption of paracetamol. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 194, p. 779–786, jun. 2023. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263876223003003>>.

SINGH, Janhavi; PAYRA, Swagata; VERMA, Sunita. Air Quality and Human Health.

Geospatial Analytics for Environmental Pollution Modeling. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 317–352. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-45300-7_13>.

SOŁTYSIK, Marcelina; MAJCHRZAK-KUCĘBA, Izabela; WAWRZYŃCZAK, Dariusz. A Coffee-Based Bioadsorbent for CO₂ Capture from Flue Gas Using VSA: TG-Vacuum Tests. **Energies**, v. 18, n. 15, p. 3965, 24 jul. 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/18/15/3965>>.

YAMEEN, Muhammad Zubair *et al.* Biodiesel production from marine macroalgae Ulva



lactuca lipids using novel Cu-BTC@AC catalyst: Parametric analysis and optimization.
Energy Conversion and Management: X, v. 23, p. 100628, jul. 2024. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590174524001065>>.