

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”
Campus de Ilha Solteira

NATHALIA LESSA SCHIAVON

**PROCESSAMENTO DE BIOCHAR A PARTIR DA BORRA DE CAFÉ -
ESTUDO DA VIABILIDADE EM APLICAÇÕES BIOMÉDICAS**

Ilha Solteira
2025



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

NATHALIA LESSA SCHIAVON

**PROCESSAMENTO DE BIOCHAR A PARTIR DA BORRA DE CAFÉ - ESTUDO DA
VIABILIDADE EM APLICAÇÕES BIOMÉDICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, para obtenção do título de Grau acadêmico Mestre(a) em Ciência dos Materiais

Área de Concentração: Conforme consta no certificado de aprovação

Orientador(a): Prof. Dr. Ana Paula Rosifini Alves

Coorientador(a): Prof. Dr. André Luiz Reis Rangel

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S329p Schiavon, Nathalia Lessa.
Processamento de biochar a partir da borra de café - estudo da viabilidade em aplicações biomédicas / Nathalia Lessa Schiavon. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
66 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

Orientador: Ana Paula Rosifini Alves
Coorientador: André Luiz Reis Rangel
Inclui bibliografia

1. Biochar. 2. Borra de café. 3. Adsorvente. 4. Medicamentos. 5. Pirólise.

Impacto potencial desta pesquisa

O impacto potencial desta pesquisa revela-se significativo nos âmbitos ambiental e tecnológico, ao promover o reaproveitamento de resíduos, o tratamento de águas residuais e o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. A utilização da borra de café apresenta-se como uma alternativa ecoeficiente para a gestão de resíduos orgânicos, enquanto o uso do biochar como adsorvente para a remoção de contaminantes farmacêuticos oferece uma solução ambientalmente sustentável e agrega valor a subprodutos.

Potential impact of this research

The potential impact of this research is significant in both environmental and technological contexts, as it fosters waste reuse, wastewater treatment, and the development of sustainable technologies. The use of spent coffee grounds represents an eco-efficient alternative for organic waste management, while the application of biochar as an adsorbent for the removal of pharmaceutical contaminants offers a sustainable solution and adds value to by-products.

Impacto potencial de esta investigación

El impacto potencial de esta investigación es relevante en los ámbitos ambiental y tecnológico, ya que promueve la reutilización de residuos, el tratamiento de aguas residuales y el desarrollo de tecnologías sostenibles. El uso de los posos de café representa una alternativa ecoeficiente para la gestión de residuos orgánicos, mientras que la aplicación del biochar como adsorbente para la eliminación de contaminantes farmacéuticos constituye una solución sustentable y agrega valor a los subproductos.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PROCESSAMENTO DE BIOCHAR A PARTIR DA BORRA DE CAFÉ: ESTUDO DA VIABILIDADE EM APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

AUTORA: NATHALIA LESSA SCHIAVON


ORIENTADORA: ANA PAULA ROSIFINI ALVES

COORIENTADOR: ANDRÉ LUIZ REIS RANGEL


Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência dos Materiais, área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANA PAULA ROSIFINI ALVES**
Data: 17/09/2025 18:38:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. ANA PAULA ROSIFINI ALVES (Participação Presencial)
Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia e Ciências - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **EDSON COCCHIERI BOTELHO**
Data: 16/09/2025 09:23:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EDSON COCCHIERI BOTELHO (Participação Presencial)
Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia e Ciências - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE ZIRPOLI SIMÕES**
Data: 15/09/2025 11:18:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ALEXANDRE ZIRPOLI SIMÕES (Participação Virtual)
Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia e Ciências - UNESP

Ilha Solteira, 28 de julho de 2025

Dedico a minha mãe Maria de Lourdes C. Lessa, por todo esforço e luta para que eu pudesse estar aqui, em memória ao meu pai Francisco José Schiavon, e também a Carlos Alberto G. Campos, por todo amor, incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela benção de poder chegar até aqui, me guiar nessa etapa da vida, me abençoando com saúde para enfrentar os desafios e dificuldades.

A minha mãe *Maria de Lourdes Carvalho Lessa*, minha maior apoiadora e que sempre fez do impossível possível para que eu pudesse crescer, me dando suporte, apoio e sendo um exemplo de mulher batalhadora

Ao meu companheiro de vida, meu amor, *Carlos Alberto Gonçalves de Campos*, por todo cuidado, carinho, suporte, conselhos, por estar ao meu lado nos dias bons e principalmente nos dias difíceis.

Aos meus sogros, *Flávio G. Campos e Maria da Conceição Silva* por todo carinho, orientação e me indicarem diversas oportunidades, incluindo a pós-graduação na UNESP.

Aos meus amigos de faculdade *Bárbara Dias, Carla Mariana, Luana Gomes, Wesllem Marques*, pela amizade, carinho, apoio e incentivo.

Em especial, deixo meu agradecimento póstumo a minha avó, *Crélia Maria Figueredo Schiavon*, que sempre me apoiou e torceu para que eu realizasse meus sonhos e também a *Prof.^a Marli Luiza Tebaldi*, por todo apoio, orientação e aprendizado durante meu último ano de graduação, se hoje estou trabalhando com biomateriais, é pela oportunidade que me abriu.

Aos meus orientadores, *Prof.^a Dr. Ana Paula Rosifini Alves e Prof.^o Dr. André Luiz Reis Rangel* por me receberem no grupo, além do apoio, incentivo, ensinamentos e orientações durante o desenvolvimento do trabalho.

As minhas colegas de grupo *Jasmine Silva, Rita Rangel, Danielle Domingues, Thais Rodrigues* por todo carinho, acolhimento e ajuda ao longo desses 2 anos.

À CAPES pelo suporte financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

A FEIS/UNESP, professores e funcionários que me auxiliaram e contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento da pesquisa e crescimento profissional e profissional.

A FEG/UNESP, seus professores, funcionários por toda contribuição, disponibilidade e auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

E um agradecimento também a todos que me incentivaram, apoiaram, ajudaram e fizeram parte de alguma forma, ao longo desses últimos anos.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”
Leonardo Da Vinci

RESUMO

A presença de contaminantes farmacêuticos em águas residuais tem motivado o desenvolvimento de materiais adsorventes com alta eficiência, baixo custo e viés sustentável. Entre os materiais à base de carbono, o biochar (BC) destaca-se como uma alternativa promissora, especialmente quando produzido a partir de biomassas residuais. Neste estudo, a borra de café foi empregada como matéria-prima para a produção de biochar por pirólise controlada, nas temperaturas de 400, 500 e 600 °C. As amostras foram caracterizadas por TGA, FTIR, DRX, MEV e DLS. A análise térmica indicou perda de massa acentuada (~85%) a partir de 400 °C. A espectroscopia no infravermelho revelou redução significativa de grupos oxigenados com o aumento da temperatura. Difractogramas de raios X mostraram estrutura predominantemente amorfa com presença de carbono turbostrático. A morfologia do biochar apresentou porosidade crescente, com diâmetros médios variando de 37,9 a 43,1 µm, e os valores de potencial zeta indicaram estabilidade coloidal crescente com o aumento da temperatura. Os resultados demonstram a influência dos parâmetros de processamento nas características finais do biochar e que a borra de café pode ser convertida em um material adsorvente funcional para remoção de fármacos em soluções aquosas. Este trabalho contribui para a literatura ao apresentar uma estratégia sustentável de valorização de resíduos sólidos orgânicos e oferecendo subsídios para o desenvolvimento de adsorventes eficientes e economicamente viáveis em aplicações biomédicas e ambientais.

Palavras-chave: Biochar; Borra de café; Adsorvente; Medicamentos; Pirólise.

ABSTRACT

The presence of pharmaceutical contaminants in wastewater has driven the development of adsorbent materials with high efficiency, low cost, and a sustainable profile. Among carbon-based materials, biochar (BC) stands out as a promising alternative, especially when produced from residual biomass. In this study, coffee grounds were used as the raw material for the production of biochar via controlled pyrolysis at 400, 500, and 600 °C. The samples were characterized using TGA, FTIR, XRD, SEM, and DLS. Thermal analysis indicated significant mass loss (~85%) starting at 400 °C. Infrared spectroscopy revealed a substantial reduction of oxygen-containing functional groups with increasing temperature. X-ray diffractograms showed a predominantly amorphous structure with turbostratic carbon. The biochar morphology exhibited increasing porosity, with average particle diameters ranging from 37.9 to 43.1 μm , and zeta potential values indicated enhanced colloidal stability at higher temperatures. The results demonstrate the influence of processing parameters on the final properties of biochar and show that coffee grounds can be converted into a functional adsorbent material for the removal of pharmaceuticals from aqueous solutions. This work contributes to the literature by presenting a sustainable strategy for valorizing organic solid waste and provides a basis for the development of efficient and economically viable adsorbents for biomedical and environmental applications.

Keywords: Biochar; Coffee grounds; Adsorbent; Pharmaceuticals; Pyrolysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Subprodutos do café obtidos durante o processamento do café. (a) polpa do café, (b) casca de cereja, (c) pele prateada, (d) borra de café.....	25
Figura 2 - Técnicas de conversão de biomassa obtidas de diferentes resíduos e seus produtos.	27
Figura 3 - Espectros de produção da pirólise.....	28
Figura 4 – Desenho esquemático de um forno de pirólise.....	29
Figura 5 - Impacto da temperatura na estrutura do biochar: (a) carbono amorfo; (b) carbono turbostrático; (c) carbono grafite	30
Figura 6 - Fluxograma das principais etapas	36
Figura 7 - Preparação da borra de café para o processo de pirólise.	37
Figura 8 - Forno tubular com tubo de quartzo utilizado no processo de pirólise.	37
Figura 9 - Biochar obtido após pirólise da borra de café.....	37
Figura 10 - Análises térmicas TGA e DTG das amostras: a)SCG, b)BC400, c)BC500 e d)BC600	44
Figura 11 - Espectros de FTIR das amostras de borra de café e biochar em diferentes temperaturas.....	46
Figura 12 - Difratoogramas de raios X (DRX) da borra de café e biochars obtidos em diferentes temperaturas.....	49
Figura 13 - Micrografias de MEV das amostras de SCG e biochars obtidos a 400 °C e 500 °C. (a–b) SCG: 500× e 1000×; (c–d) BC400: 500× e 1000×; (e–f) BC500: 500× e 1000×.	50
Figura 14 - Estrutura morfológica da amostra BC600 observada por MEV em diferentes ampliações.	51
Figura 15 - Distribuição do tamanho de partículas por DLS para as amostras de biochar: (a) triplicata BC400; (b) triplicata BC500; (c) triplicata BC600.....	53
Figura 16 - Potencial Zeta médio das amostras BC400, BC500 e BC600.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros DRX.....	39
Tabela 2 - Caracterização química de amostra de borra de café (ao natural e base seca)	41
Tabela 3 - Dados de rendimento das amostras de biochar para diferentes condições de pirólise	42
Tabela 4 – Eventos térmicos e variação de massa do SCG e BC em diferentes temperaturas avaliados por análise termogravimétrica (TGA).....	45
Tabela 5 - Vibrações características da caracterização por FTIR.....	47
Tabela 6 - Tamanho de poro médio das amostras de BC.	52
Tabela 7 - Resumo dos resultados de tamanho de partículas por DLS para as amostras analisadas.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BC	Biochar
DLS	Espalhamento Dinâmico de Luz
DRX	Difração de Raios X
DTG	Termogravimetria Derivada
FEG	Faculdade de Engenharia e Ciências – Câmpus de Guaratinguetá/SP
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
HTC	Carbonização hidrotérmica
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PZ	Potencial Zeta
SCG -	Borra de café
TGA	Análise Termogravimétrica
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVO	19
	2.1.1 Objetivo Geral	19
	2.1.2 Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
	3.1 BIOCHAR.....	20
	3.1.1 Definição e histórico	20
	3.1.2 Propriedades físico-químicas e aplicação	21
	3.2 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR	23
	3.2.1 Resíduos urbanos e biomassas lignocelulósicas	23
	3.2.1 Borra de café	24
	3.1 PROCESSAMENTO DO BIOCHAR.....	26
	3.1.1 Pirólise	27
	3.1.2 Influência da temperatura	30
	3.1.3 Influência da taxa de aquecimento	31
	3.1.4 Influência do tempo de residência	32
	3.2 APLICAÇÃO DO BIOCHAR COMO ADSORVENTE.....	33
	3.2.1 Adsorção e o potencial do biochar	33
	3.2.2 Fatores que influenciam a eficiência de adsorção do biochar	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
	4.1 MATERIAIS	36
	4.2 METODOLOGIA UTILIZADA.....	36
	4.3 PROCESSAMENTO DO BIOCHAR.....	36
	4.4 ANÁLISE DE MATERIAL ORGÂNICO.....	38
	4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA/DTG).....	38

4.6	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	38
4.7	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	39
4.8	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	39
4.9	DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO E POTENCIAL ZETA DE PARTÍCULA.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1	ANÁLISE DE MATERIAL ORGÂNICO.....	41
5.2	ANÁLISE DE RENDIMENTO	42
5.3	ANÁLISES TÉRMICAS	42
5.4	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	45
	5.4.1 Espectroscopia de infravermelho por transformada de fourier (FTIR).....	45
	5.4.2 Difração de Raios X (DRX).....	47
5.5	ANÁLISE MORFOLÓGICA.....	49
5.6	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE SUPERFÍCIE	52
	5.6.1 Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS).....	52
	5.6.2 Potencial Zeta.....	54
6	CONCLUSÃO	56
6.1	SUGESTÃO DE ESTUDOS FUTUROS:	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos das atividades humanas sobre os recursos hídricos tem levantado preocupações ambientais em escala global e impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à mitigação da poluição ambiental, em especial ao tratamento de águas residuais. Entre os diversos poluentes identificados em ambientes aquáticos, destacam-se os contaminantes emergentes, compostos como produtos farmacêuticos, pesticidas e químicos industriais, que não são comumente monitorados no meio ambiente, mas possuem o potencial de gerar efeitos adversos na ecologia e saúde humana (TREMBLAY; STEWART; NORTHCOTT, 2011). Dentre esses, os contaminantes farmacêuticos têm despertado atenção devido à sua persistência, baixa biodegradabilidade e potencial toxicidade para organismos aquáticos.

Substâncias como antibióticos, analgésicos, hormônios e antidepressivos, mesmo em concentrações baixas, têm sido detectadas em ambientes aquáticos (AIB; PARVEZ; CZÉDLI, 2025; MINILLO et al., 2023), representando riscos potenciais à saúde humana e de organismos por meio da bioacumulação e da exposição crônica. Esses compostos são frequentemente descartados de forma inadequada pela população ou lançados diretamente pela indústria, acumulando-se em efluentes domésticos e industriais (CHAUHAN et al., 2022; ZUNGU et al., 2022).

Apesar do avanço tecnológico, os sistemas convencionais de tratamento de esgoto apresentam limitações na remoção eficaz desses compostos, principalmente devido à sua natureza complexa, o que evidencia a necessidade de abordagens complementares, mais eficientes e ambientalmente sustentáveis (RAY; GUSAIN; KUMAR, 2020a). Dentre essas alternativas, destaca-se o uso de materiais porosos com elevada área superficial e grupos funcionais adequados, capazes de atuar como potenciais adsorventes.

Nesse contexto, o biochar vem sendo amplamente estudado como material promissor, sobretudo por sua origem renovável e suas propriedades ajustáveis. Trata-se de um produto carbonáceo obtido por pirólise de biomassas orgânicas em atmosfera inerte, com características como elevada estabilidade térmica, porosidade e elevada área superficial (ANDRADE et al., 2020). Quando produzido a partir de resíduos urbanos ou agroindustriais, o biochar também contribui para estratégias de valorização de resíduos e economia circular.

A borra de café é uma dessas biomassas residuais com elevado potencial para aplicação tecnológica. Proveniente da preparação da bebida mais consumida no mundo, esse resíduo apresenta alta disponibilidade e composição rica em carbono, lignina e compostos fenólicos, favorecendo sua conversão em biochar com características estruturais e químicas relevantes

(PICCA et al., 2023). No entanto, o descarte indiscriminado da borra de café ainda representa um passivo ambiental considerável.

A elevada geração de borra de café está diretamente associada ao elevado consumo global. Um levantamento atual sobre o consumo mundial de café indica que, em 2024 a Europa foi responsável por aproximadamente 53,7 milhões de sacas no ano de 2024, o que representa cerca de 30,3% do consumo global. Em seguida destacam-se a Ásia e Oceania com 25,8%, América do Norte, com 17,5%, e América do Sul com 15,8% (FERREIRA; CAVATON, 2025). Esse elevado consumo está diretamente associado a geração de resíduos orgânicos, especialmente a borra de café, cuja produção estimada é de cerca de 650kg para cada tonelada de café processado (ZHAO et al., 2024b).

Assim, a borra de café se apresenta como uma matéria-prima favorável para a produção de biochar, considerando sua disponibilidade, baixo custo e composição química. A utilização desse resíduo representa uma alternativa sustentável para a destinação adequada da borra, como também possibilita a formação de um material com propriedades relevantes para atuar como adsorvente de contaminantes emergentes, integrando duas frentes de interesse ambiental, o tratamento de poluentes de difícil remoção e a valorização de resíduos orgânicos gerados em larga escala.

Diante desse panorama, o presente trabalho teve como objetivo a produção e a caracterização físico-química de biochar obtido a partir da borra de café, por meio de pirólise controlada. O estudo concentrou-se na análise de propriedades estruturais, térmicas e morfológicas do material, com o intuito de verificar sua viabilidade como insumo funcional para aplicações futuras, incluindo seu uso como adsorvente em sistemas de tratamento de águas contaminadas.

2 OBJETIVO

2.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de valorização da borra de café por meio da produção de biochar, com foco na caracterização de suas propriedades físico-químicas e estruturais, visando aplicações futuras em sistemas biomédicos, especialmente como material adsorvente em estratégias de purificação de fluidos ou controle ambiental em contextos hospitalares.

2.1.2 Objetivos Específicos

Para o cumprimento do objetivo geral, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Produzir biochar a partir da borra de café por pirólise controlada, variando as condições térmicas de processamento (400 °C, 500 °C e 600 °C) sob atmosfera inerte;
- Avaliar o rendimento do biochar obtido em cada condição de pirólise;
- Caracterizar as amostras quanto às propriedades térmicas, estruturais, químicas e morfológicas, por meio de TGA/DTG, DRX, FTIR e MEV;
- Investigar as propriedades coloidais e superficiais em suspensão aquosa por DLS e potencial zeta;
- Correlacionar os parâmetros de processamento com as características físico-químicas do biochar visando sua aplicabilidade futura como material adsorvente em contextos biomédicos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordadas as definições de um material adsorvente e biochar e biomassa, demonstrando ainda as possibilidades de aplicação do biochar, assim como, o método de obtenção via pirólise, e como os parâmetros de processamento afetam as características finais do biochar.

3.1 BIOCHAR

3.1.1 Definição e histórico

O biochar (BC) é um material rico em carbono, estável e poroso, que pode ser obtido pelo método de carbonização ou pirólise em atmosfera inerte ou baixa oxigenação de diferentes tipos de matérias-primas, como lodo, esgoto e diversos tipos de resíduos orgânicos (SARKAR et al., 2024; WANG; WANG, 2019).

Historicamente, o uso do BC data de no mínimo 2000 anos e seu crescente interesse está associado à comunidades indígenas na Bacia Amazônica, devido às evidências do uso de biochar em solos excepcionalmente férteis conhecidos como Terra Preta (LEHMANN; JOSEPH, 2024). Nesses solos, os índices de potássio (K), fósforo (P) e nitrogênio (N) eram extremamente elevados devido a quantidade de biochar incorporada ao solo e essa região permanece altamente fértil mesmo após os séculos de lixiviação provocada pelas chuvas tropicais (HUNT et al., 2010; KAMARUDIN et al., 2022).

Contudo, a terra preta e o BC não são as mesmas coisas, ambos se diferem tanto em composição quanto na estrutura do carbono (KAMARUDIN et al., 2022). As Terras Pretas não são os únicos tipos de solos que contêm biochar e ele pode ser encontrado em solos ao redor do mundo todo devido a ocorrência de incêndios naturais. Além disso, o BC tem sido utilizado há muito tempo na agricultura em diversas regiões da Ásia, especificamente Japão e Coreia, porém as Terras Pretas são creditadas por trazer o material à evidência e consequente impulso nas pesquisas sobre o potencial e benefícios da aplicação do BC no solo (KAMARUDIN et al., 2022; VARKOLU et al., 2025).

O termo Biochar foi adotado mais recentemente, inicialmente para diferenciar o carbono ativado derivado de combustíveis fósseis do carbono obtido a partir da biomassa, e, posteriormente, para substituir o termo carvão vegetal como combustível e diferenciá-lo também do carvão mineral (LEHMANN; JOSEPH, 2024).

Com as pesquisas sobre a Terra Preta em meados de 1990, descobriu-se o potencial do biochar na adsorção de dióxido de carbono e consequentemente redução nos impactos

ambientais. Segundo Kamarudin (2022), após a primeira reunião da *International Biochar Advocacy Organization* que ocorreu em 2007 na Austrália, a quantidade de estudos sobre o biochar tem aumentado progressivamente.

Diante desse panorama, a história do biochar evidencia sua transição de uma prática agrícola adotada por civilizações antigas para um campo de investigação científica em constante expansão, por meio da consolidação do termo e estudo sobre suas propriedades e aplicações. O crescente interesse pelo tema reflete a busca por soluções sustentáveis e eficazes diante das demandas ambientais contemporâneas, consolidando o biochar se como um material de grande relevância científica e ambiental atualmente.

3.1.2 Propriedades físico-químicas e aplicação

A composição do biochar é predominantemente composta por carbono, além disso, se encontra, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre, compostos orgânicos voláteis e minerais diversos em pequenas quantidades, sua composição. Sua composição, assim como as características variam de acordo com a fonte de matéria prima utilizada e pelas condições de processamento (HANDISO; PÄÄKKÖNEN; WILSON, 2024; RAMBHATLA et al., 2025).

Outra característica do biochar é a presença de formas específicas de carbono orgânico, que são conhecidas como estruturas de anéis aromáticos fundidos. A formação dessas estruturas ocorre durante a pirólise e são fundamentais para a aplicação do biochar como adsorvente. A química da estrutura orgânica do carbono é diferente entre o BC e sua matéria prima, uma vez que é empobrecida de oxigênio e hidrogênio, porém, suas características macro morfológicas são semelhantes, exceto pela coloração preta no BC (LEHMANN; JOSEPH, 2024).

As aplicações do biochar abrange diversos setores, mas com maior enfoque nas áreas de proteção ambiental. Seu principal setor é a agronomia, onde o biochar pode atuar como remediador de solo, mas também é aplicado no setor energético, por meio da produção de bioenergia e no setor de recursos naturais, onde apresenta potencial de ser utilizado como adsorvente no tratamento de águas residuais.

Pesquisas recentes indicam que o BC produzido a partir de diferentes resíduos, pode ser utilizado na adsorção e remoção de fármacos em sistemas aquosos, como antibióticos, anti-inflamatórios e hormônios, devido a combinação de alta área de superfície, porosidade e a presença de grupos funcionais de superfície que interagem com moléculas farmacológicas por meio de ligações hidrofóbicas, π - π e ponte de hidrogênio (HAMA AZIZ et al., 2024; KANG et al., 2022). Essa é uma estratégia promissora, não apenas para o tratamento de águas residuais, mas também em aplicações biomédicas. Estudos recentes têm explorado o uso de materiais a

base de carbono como adsorvente em sistemas biológicos, incluindo a purificação de sangue, visando a remoção de toxinas e excesso de medicamentos (MOZAFFARI; ALIMOHAMMADI; GASHTI, 2025; WANG et al., 2021). Nessas aplicações, a elevada porosidade, área de superfície e possibilidade de funcionalização química são de grande relevância por permitirem interações específicas com moléculas-alvo por meio de mecanismos semelhantes aos observados em adsorção em soluções aquosas. Essa abordagem abre novas perspectivas para o desenvolvimento de adsorventes biomédicos a base de biochar, oferecendo alternativas de baixo custo e biocompatíveis.

Apesar disso, grande partes das pesquisas envolvendo aplicação do BC se voltam para sequestro de carbono, condicionamento de solo e gestão de resíduos, contudo, estudos mostram seu potencial de aplicação na área médica também, em sistemas de controle e entrega de medicamento e sensores (MAKWIKWI et al., 2022; PRATAP et al., 2021; RAMANAYAKA et al., 2020; ZHUO et al., 2023).

Essa alta aplicabilidade do BC se deve também a possibilidade de adaptar suas características de acordo com a necessidade por meio da mudança da matéria prima e processo de produção. Porém, as principais propriedades do biochar são: estabilidade térmica e química, alta área de superfície e presença de bons grupos funcionais de superfície como hidroxilas, carboxilas e carbonilas (SARKAR et al., 2024; SHARMA et al., 2021; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020). Tais características estruturais e químicas, além do teor de carbono, capacidade de troca catiônica e aniônica, rede de poros uniformemente distribuída, com microporos, mesoporos e macroporos, não apenas ampliam a aplicabilidade do BC em diferentes áreas como também favorecem seu uso específico, como em processos de adsorção por exemplo. Estudos recentes demonstraram que, quando comparado ao carvão ativado, o biochar apresenta desempenho superior para a remoção de diversos contaminantes (KAMARUDIN et al., 2022).

Com base nas propriedades físico-químicas abordadas, fica evidente que o BC é um material versátil, além disso, sua capacidade de atuar como adsorvente, condicionador de solo e agente sequestrador de carbono reforça seu potencial como uma alternativa sustentável em diferentes contextos. Assim, o avanço nas técnicas de modificação e caracterização tende a expandir ainda mais seu uso, consolidando-o como uma solução promissora frente aos desafios tecnológicos e ambientais atuais.

3.2 MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR

3.2.1 Resíduos urbanos e biomassas lignocelulósicas

O crescente aumento populacional, a industrialização e a intensificação do consumo estão levando à ampliação crescente da geração de resíduos urbanos. Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são constituídos por diversos materiais descartados em domicílios, comércios e indústrias. Uma parcela dessa diversidade, é formada por resíduos orgânicos, os quais podem ser classificados em biomassas lignocelulósicas e não lignocelulósicas, dependendo da sua composição estrutural (ZHAO, 2021).

Biomassas lignocelulósicas são compostas predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina. Esse grupo inclui subprodutos da agroindústria, como palhas, cascas de arroz, milho e café, por exemplo, bem como resíduos de origem florestal (JAFRI et al., 2018). Por outro lado, as biomassas não lignocelulósicas, são constituídas por materiais com baixa ou nenhuma quantidade de celulose e lignina. Esse grupo abrange o lodo de esgoto, resíduos animais, algas, peles, entre outros (AMALINA et al., 2022; TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016). Tais resíduos apresentam obstáculos significativos de gerenciamento, devido à sua complexidade composicional e a presença de constituintes como metais pesados, fósforo e enxofre (AMALINA et al., 2022).

Segundo o Banco Mundial (2020), cerca de 2,01 bilhões de toneladas de RSU são geradas anualmente e estima-se que até 2050, essa quantidade aumente para 3,40 bilhões de toneladas por ano, impulsionada principalmente pelo crescimento urbano. A gestão adequada desses resíduos, especialmente os de natureza orgânica, representa não apenas um desafio crescente, mas também, uma oportunidade para o desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento e valorização. Nesse contexto, a conversão termoquímica, como a pirólise, tem se destacado como uma alternativa promissora para o tratamento e a transformação de biomassas residuais em produtos de valor agregado, como o biochar.

A relação entre as categorias de biomassa e a produção de biochar é um fator determinante para as propriedades físico-químicas do material gerado. As biomassas lignocelulósicas, tendem a produzir biochar com maior rendimento de carbono, estabilidade estrutural e estrutura porosa, enquanto os resíduos não lignocelulósicos podem oferecer elementos funcionais de superfície adicionais, que beneficiem certas aplicações, embora possam demandar maior cuidado quanto a presença de contaminantes ou compostos voláteis (QIU et al., 2021; RAMEZANZADEH et al., 2023).

Outro fator importante é a umidade da biomassa, que influencia diretamente a eficiência do processo. Altos teores de umidade demandam maior consumo energético para a evaporação

da água e comprometem a eficiência térmica do sistema, retardando a elevação da temperatura do reator, atrasando a degradação térmica dos compostos orgânicos e reduzindo a eficiência do processo de pirólise. Biomassas com menor teor de umidade, por outro lado, favorecem um processo mais sustentável, com menor demanda energética e maior rendimento (TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020; TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016).

Além da umidade, a proporção de celulose, hemicelulose e lignina varia em diferentes tipos de biomassa e influencia diretamente a composição do biochar. Essa variação afeta o conteúdo de matéria volátil e os valores de aquecimento. A lignina em especial apresenta maior contribuição na formação do biochar, sendo o principal responsável pelo acúmulo de carbono e pelo rendimento em massa do produto final (JAFRI et al., 2018).

Do ponto de vista elementar, a biomassa é composta majoritariamente de carbono, oxigênio, enxofre, nitrogênio e pequenas quantidades de metais. Também podem ser encontrados elementos como magnésio, cloro e potássio. Tripathi et al. (2016) demonstraram que o carbono é o elemento predominante nas mais diversas biomassas, seguido por oxigênio e nitrogênio. Porém, a presença e proporção desses elementos são condicionadas pela espécie vegetal, condições de crescimento e localização geográfica do cultivo.

Dessa forma, a escolha adequada de matéria-prima, é essencial para direcionar as propriedades físico-químicas do biochar alinhando composição e finalidade de uso. A valorização de resíduos urbanos, mostra-se uma solução no âmbito ambiental, social e tecnológico. Nesse contexto, resíduos orgânicos de fácil obtenção e elevado volume, como a borra de café, ganham ainda mais destaque, uma vez que ela é amplamente gerada no cotidiano urbano e na maioria das vezes, descartada de maneira inadequada ou destinada a aterros sanitários sem aproveitamento. No entanto, suas características estruturais e químicas a tornam uma biomassa promissora para conversão termoquímica, contribuindo tanto para a redução de resíduos quanto a produção de materiais funcionais de elevado valor agregado.

3.2.1 Borra de café

O café gradualmente se tornou uma das bebidas mais populares no mundo, perdendo apenas para o petróleo como commodity mais comercializada (MURTHY; MADHAVAN NAIDU, 2012; ZHAO et al., 2024a). Somente o Brasil é responsável por 40% do café tipo arábica consumido mundialmente, tendo produzido no ano de 2024, 54,2 milhões de sacas de 60kg (EMBRAPA, 2024). O alto consumo da bebida, torna a indústria cafeeira uma das maiores contribuintes na geração de resíduos alimentares. A borra de café (*do inglês Spent Coffee Grounds – SCG*) é um resíduo descartado frequentemente após a preparação da bebida, mas

representa uma biomassa valiosa, de fácil acesso e rica em matéria orgânica. Porém, além da borra, a cadeia produtiva do café, gera outros resíduos, como a casca, a pele e a polpa (Figura 1), resultando em toneladas de materiais orgânicos descartados anualmente. Esses dados associados a falta de métodos eficientes e seguros de reciclagem ou reaproveitamento, e ações inadequadas de gerenciamento de resíduos intensificam os impactos ambientais associados à produção e ao consumo do café.

Figura 1 - Subprodutos do café obtidos durante o processamento do café. (a) polpa do café, (b) casca de cereja, (c) pele prateada, (d) borra de café.



Fonte: Adaptado de Murthy, Madhava Naidu (2012).

A composição química da SCG pode variar significativamente em função do tipo de grão (arábica ou robusta), método de cultivo, torrefação e forma de preparo da bebida. Cafés do tipo robusta, costumam apresentar maior teor de lignina, enquanto o arábica tende a conter mais lipídios e carboidratos. Essas variações refletem nas proporções de celulose (8-14%), hemicelulose (30-40%) e lignina (25-33%), cinzas, lipídios, compostos fenólicos e proteínas (OBRUCA et al., 2015) presentes na borra, influenciando diretamente o rendimento e propriedades como porosidade, estabilidade térmica e área de superfície do biochar. Estudos indicam ainda a presença de carboidratos, proteínas, cafeína, óleos e umidade, que também podem variar de proporção conforme o tipo de grão, grau de torra e preparo, fatores que podem alterar a estrutura química da borra, afetando formação de grupos funcionais durante o processo de pirólise (AHMED et al., 2024; OBRUCA et al., 2015).

As propriedades químicas e estruturais da borra, somadas à ampla disponibilidade e à crescente preocupação ambiental, têm impulsionado voltadas à sua valorização. Entre as alternativas investigadas, destacam-se a produção de bio-óleo (VARDON et al., 2013), biodiesel (UDDIN et al., 2019) e biochar, este último, aplicado para diferentes fins, incluindo a remoção de poluentes de soluções aquosas como, produtos farmacêuticos, metais pesados (ISLAM et al.,

2022) e pesticidas (BENYEKKOU et al., 2020; ISLAM et al., 2022; MA et al., 2023), além do seu uso na agronomia e compostagem.

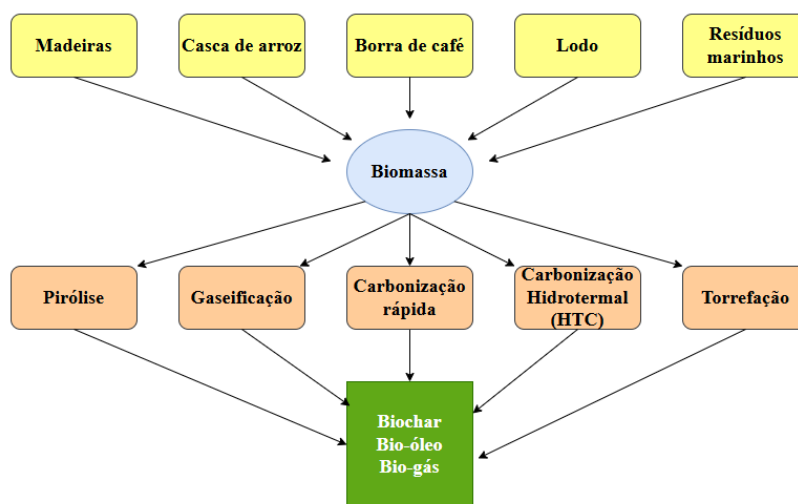
Nguyen et al. (2021) e El-Shafie et al. (2024) investigaram a eficiência de biochar produzido a partir da SCG, tanto na forma natural quanto ativada, na remoção de antibióticos presentes em soluções aquosas. Em ambos os estudos, os materiais apresentaram desempenho satisfatório, com superioridade observada nas amostras ativadas que apresentaram resultados positivos, mas com o BC ativado obtendo melhor desempenho. Esses resultados reforçam o potencial do biochar oriundo à partir da borra de café como uma estratégia de valorização de resíduos, inserida em um modelo de economia circular, além de contribuir para a mitigação de impactos ambientais da cadeia cafeeira e para o tratamento de águas contaminadas.

Apesar das vantagens evidentes, o uso de SCG como matéria-prima para a produção de biochar ainda pode apresentar desafios, tal como o teor de umidade, que pode variar de 5-10%, exigindo processos de pré-secagem para viabilizar a conversão termoquímica de forma eficiente (AHMED et al., 2024). Esse fator pode impactar no rendimento e qualidade do biochar, além de elevar o consumo energético. Além disso, a composição química da borra varia conforme o tipo de grão, torra e preparo, pode afetar a reprodutibilidade e desempenho do biochar. Outro fator limitante refere-se a logística de coleta e armazenamento do resíduo, por ser uma biomassa úmida e rica em matéria orgânica, a borra está sujeita a degradação microbológica, como o crescimento de fungos e mofo. Tais aspectos reforçam a necessidade de estudos sistemáticos que visem a padronização da borra, promovendo sua valorização de forma segura, eficiente e ambientalmente sustentável.

3.1 PROCESSAMENTO DO BIOCHAR

A conversão de biomassa em produto de valor agregado pode ocorrer por diferentes fontes de biomassas e métodos de conversão termoquímica, gerando o biochar, bio-óleo e bio-gás como produtos finais (Figura 2). Ressalta-se que, embora cada técnica possa gerar múltiplos produtos, há sempre um produto majoritário em função das condições operacionais específicas, enquanto os subprodutos são obtidos em menores proporções.

Figura 2 - Técnicas de conversão de biomassa obtidas de diferentes resíduos e seus produtos.



Fonte: Autoria própria (2025).

A produção de biochar, bio-óleo e bio-gás é influenciada por parâmetros do processo, como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência, tamanho de partícula, gás de arraste, entre outros. Esses parâmetros não apenas controlam o rendimento do biochar e subprodutos, mas também afetam a qualidade e propriedades dos produtos, por isso é importante discutir o efeito de cada condição de processo (LENG; HUANG, 2018; PAHNILA et al., 2023).

3.1.1 Pirólise

A pirólise, em particular, é um processo de degradação térmica de resíduos por meio da aplicação de calor, geralmente entre 300-1300°C, na ausência de oxigênio. Nesse contexto gases inertes como hélio, argônio e nitrogênio podem ser utilizados como gás transportador (JERZAK; ACHA; LI, 2024). Como resultado do processo, três produtos principais são gerados: o biochar (fração sólida), o bio-óleo (fração líquida condensável) e também uma mistura gasosa não condensável conhecida como gás de pirólise ou biogás (KUMAR; REMYA, 2023).

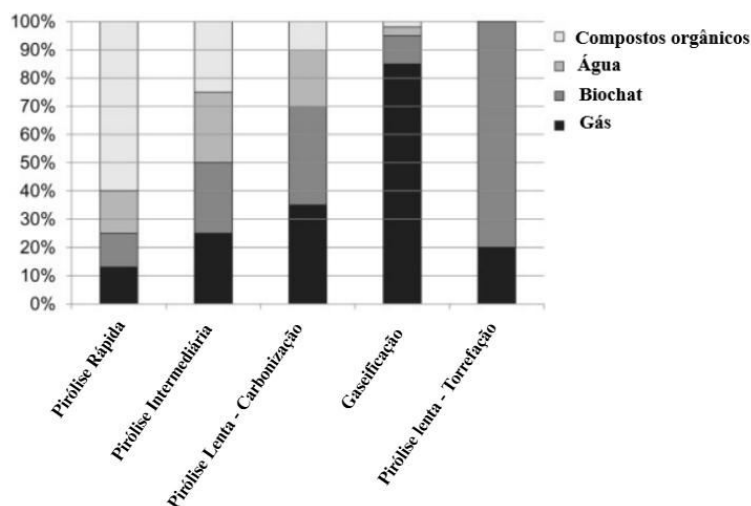
As características desses produtos são fortemente influenciadas pelos parâmetros operacionais adotados durante o processo de pirólise como taxa de aquecimento, temperatura de operação, fluxo de gás e tamanho de partícula do resíduo, além das propriedades físico-químicas da biomassa utilizada (KUMAR; REMYA, 2023; PAHNILA et al., 2023). No caso do biochar, fatores como área de superficial, grupos funcionais de superfície, pH e rendimento, variam consideravelmente de acordo com as condições do processo (KUMAR; REMYA, 2023; RAMBHATLA et al., 2025). Estudos indicam que para produção de biochar e bio-óleo, a

utilização de taxas de aquecimento mais altas resulta em um baixo rendimento, mas para a produção de biogás, essas temperaturas são mais eficazes (JERZAK; ACHA; LI, 2024; RAMBHATLA et al., 2025).

A pirólise pode ser classificada em 4 tipos: pirólise lenta, rápida e intermediária. A distinção entre essas categorias, é feita com base no tempo de aquecimento, a temperatura de pirólise e o tempo de residência. Na pirólise lenta, o tempo de aquecimento é significativamente menor que o tempo de residência, já na pirólise rápida, ocorre o inverso. A pirólise do tipo flash envolve um tempo de aquecimento extremamente alto com um tempo de residência muito curto, abaixo de 0,5s. A pirólise intermediária, por sua vez, apresenta uma taxa de aquecimento entre 1-10°C/s e tempo de residência da biomassa em escala de minutos. (BASU, 2018; PAHNILA et al., 2023).

A Figura 3 apresenta a proporção relativa dos produtos obtidos nos diferentes processos termoquímicos de conversão da biomassa, incluindo a pirólise rápida, intermediária e lenta. Observa-se que a pirólise lenta favorece a produção de biochar, enquanto a rápida favorece a formação de compostos orgânicos voláteis e água.

Figura 3 - Espectros de produção da pirólise



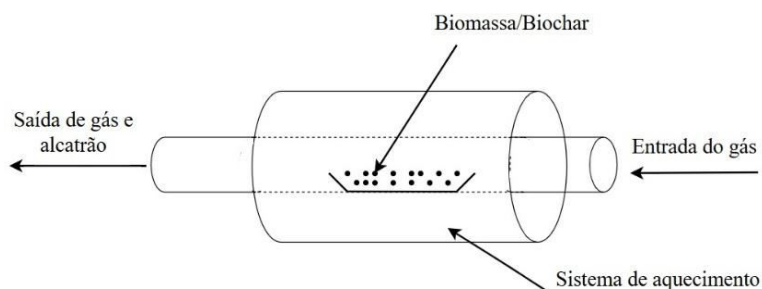
Fonte: Adaptado de Bridgwater (2012).

O processo da pirólise pode ser dividido em etapas conforme aspectos físicos que ocorrem durante a produção do biochar. No primeiro estágio, chamado de pré-pirólise (25-200°C), ocorre a evaporação de umidade e consequente quebra de ligações químicas, formação de grupos hidroperóxidos e liberação de voláteis leves. A etapa seguinte, conhecida como pirólise principal (200-500°C), envolve a desvolatilização e decomposição da hemicelulose e celulose. Por fim, o

estágio final é a fase de formação de produtos carbonáceos (acima de 500°C) e promove a degradação da lignina e a quebra (craqueamento) ou recombinação de compostos instáveis, resultando em moléculas de baixo peso molecular ou compostos voláteis/inertes de alto peso molecular (AL-RUMAIHI et al., 2022; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020).

Quanto ao equipamento, existem diferentes tipos de reatores, que podem ser classificados pela taxa de aquecimento, modo de operação e o sistema de aquecimento (direto ou indireto). Para produção de biochar por pirólise lenta e em escala laboratorial, é comum o uso de um reator de leito fixo (Figura 4), nos quais a biomassa é inserida dentro do reator, o mesmo é vedado e aquecido a temperatura desejada sob atmosfera inerte. Após o resfriamento, biochar produzido pode ser removido de forma segura (SLEZAK et al., 2023).

Figura 4 – Desenho esquemático de um forno de pirólise.



Fonte: Autoria própria (2025).

A pirólise possui vantagens importantes quando comparada com outros métodos de conversão térmica, como a menor emissão de poluentes, simplicidade operacional e possibilidade de utilizar uma ampla gama de matérias-primas para produção de biochar, bio-óleo e biogás, como resíduos industriais, florestais e domésticos (CZAJCZYŃSKA et al., 2017). Essas características tornam o processo não apenas eficiente na produção de materiais de valor agregado, mas como uma forma promissora de gerenciamento de resíduos contribuindo significativamente para a mitigação de impactos ambientais (CZAJCZYŃSKA et al., 2017; RAJPUT et al., 2024).

Apesar de todos os pontos positivos e se destacar como uma rota promissora para conversão termoquímica de resíduos, um dos principais desafios está na gestão eficiente dos subprodutos da pirólise, como o bio-óleo e bio-gás, pois requerem etapas subsequentes de condensação, purificação e armazenamento, demandando tecnologias complementares e que aumentam a complexibilidade e custo operacional. Outro entrave é a falta de padronização nos projetos de reatores, o que dificulta a reprodutibilidade dos resultados e comparação entre

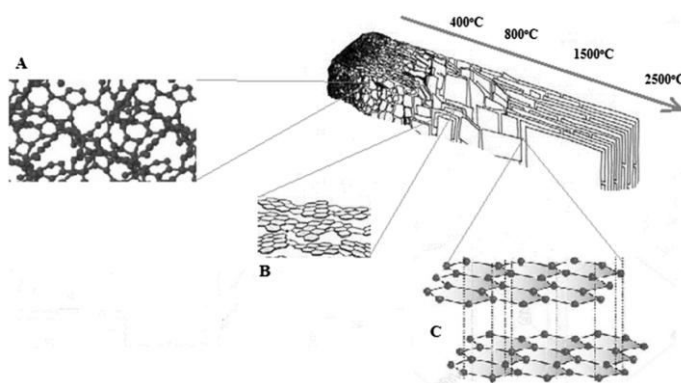
diferentes estudos (CZAJCZYŃSKA et al., 2017). Assim, embora a pirólise apresente alto potencial, a superação dessas limitações é essencial para a melhoria da tecnologia.

3.1.2 Influência da temperatura

O efeito da temperatura de processamento nas características do biochar tem sido amplamente investigado (KHATER et al., 2024; ROSHAN; GHOSH; MAITI, 2023; ZHAO; TA; WANG, 2017), evidenciando seu impacto na estrutura do material, na área de superfície e também nos grupos funcionais de superfície. A temperatura de pirólise influencia diretamente a aromaticidade e o grau de condensação aromática do biochar, modificando suas propriedades físico-químicas e, conseqüentemente, seu desempenho em diferentes aplicações.

Diversos estudos apontam que o aumento da temperatura promove a formação de estruturas aromáticas mais estáveis, enquanto reduz a presença de componentes não aromáticos instáveis, tanto em dimensão, quanto em quantidade. Com o avanço da temperatura, ocorre a degradação progressiva de macromoléculas, como a celulose, hemicelulose, lignina, polissacarídeos e proteínas presentes na biomassa, favorecendo a geração de anéis aromáticos isolados. No caso de temperaturas ainda mais elevadas, esses anéis passam a se organizar, originando estruturas condensadas em forma de folhas aromáticas pequenas e imperfeitas, formando os chamados cristalitos turbostráticos (LENG; HUANG, 2018; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020). A Figura 5 apresenta as mudanças que ocorrem na estrutura do biochar com o aumento da temperatura de pirólise.

Figura 5 - Impacto da temperatura na estrutura do biochar: (a) carbono amorfo; (b) carbono turbostrático; (c) carbono grafite



Fonte: Tomczyk; Sokolowska; Boguta (2020b).

Com relação à área de superfície, temperaturas mais elevadas promovem alterações na porosidade do biochar devido a decomposição da matéria, liberação de compostos voláteis e consequente formação de microporos, o que acarreta em um aumento na área superficial. Nessas condições, substâncias que bloqueiam os poros são eliminadas ou degradadas termicamente, proporcionando uma maior área de acesso externo (KATYAL; THAMBIMUTHU; VALIX, 2003).

Outro aspecto relevante é a modificação da hidrofobicidade do biochar em função da temperatura. Estudos de Ghani et al. (2013) e Luo et al. (2024) demonstraram que, em temperaturas inferiores a 500°C, o biochar tende a ser mais hidrofílico, enquanto acima dessa linha, torna-se predominantemente hidrofóbico, além de apresentar maior estabilidade.

No que se refere aos grupos funcionais de superfície, temperaturas superiores a 600°C promovem processos de desoxigenação e desidratação da biomassa, resultando na redução ou eliminação de grupos contendo oxigênio e hidrogênio, como carboxilas e hidroxilas (BARSZCZ; ŁOŻYŃSKA; MOLEND, 2024; KARUNANITHI et al., 2017).

3.1.3 Influência da taxa de aquecimento

A velocidade com que a temperatura é elevada no processo de pirólise exerce forte impacto na produção e propriedades do biochar. De acordo com Tripathi; Sahu e Ganesan (2016) em baixas temperaturas de aquecimento, as chances de ocorrência de reações secundárias durante a pirólise são significativamente reduzidas ou até mesmo eliminadas. Além disso, aquecimentos lentos evitam o craqueamento térmico da biomassa, favorecendo um maior rendimento de biochar. Diferentemente do que ocorre em altas taxas de aquecimento, que intensificam a fragmentação térmica da biomassa e provavelmente aumentam a despolimerização da biomassa em componentes voláteis primários, o que reduz a formação de biochar e favorece a produção das frações líquida (bio-óleo) e gasosa (bio-gás) (LENG; HUANG, 2018; TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016).

A estabilidade do biochar também sofre influência da taxa de aquecimento. Estudos indicam que taxas de aquecimento mais baixas podem ser favoráveis à formação de estruturas carbonáceas estáveis, especialmente em temperaturas de pirólise mais altas. Já taxas de aquecimento na faixa de 25°C/min, proporcionam mais tempo de exposição da biomassa à temperatura de pirólise, favorecendo a aromatização e formação de estruturas gráficas mais organizadas (CROMBIE et al., 2015; LENG; HUANG, 2018). A utilização de um aquecimento mais lento tende a preservar a estrutura do material precursor, enquanto taxas mais altas podem induzir colapsos celulares, fusão localizada, transformação de fases e inchaço da biomassa,

resultando em perda estrutural. Biochars obtidos sob altas taxas de aquecimento frequentemente apresentam aglomerados menores de anéis aromáticos e regiões parcialmente carbonizadas, indicando uma conversão incompleta da biomassa (LENG; HUANG, 2018; PAHNILA et al., 2023).

É importante considerar que a escolha da taxa de aquecimento deve estar alinhada aos objetivos do processo, pois analisar somente o rendimento do biochar, pode não ser vantajoso quando o objetivo for obter uma superfície específica. Assim, o controle desse parâmetro torna-se essencial para a otimização e qualidade dos produtos obtidos na pirólise.

3.1.4 Influência do tempo de residência

O tempo de permanência da biomassa no reator é outro fator crítico no processo de pirólise, pois exerce influência relevante sobre o rendimento, estrutura e estabilidade do biochar, embora seus efeitos não possam ser considerados isoladamente. Em condições de temperaturas elevadas, o tempo de residência prolongado favorece a repolimerização dos constituintes da biomassa, intensificando a carbonização e resultando em maior rendimento do biochar (TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016). Além disso, tempos de residência mais longos, têm sido associados ao desenvolvimento de micro e macroporos na estrutura do biochar, contribuindo para propriedades mais adequadas e vantajosas para aplicações como adsorvente (ZORNOZA et al., 2016). Biochar produzidos com maior tempo de residência também apresentam maior estabilidade oxidativa e térmica, que é associada a menor proporção de compostos orgânicos instáveis, o que pode prejudicar seu uso no solo (CROSS; SOHI, 2013; TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016).

Por outro lado, em temperaturas mais baixas, o aumento do tempo pode intensificar a liberação de voláteis, reduzindo a fração sólida (LENG; HUANG, 2018). Dessa forma, o tempo de residência deve ser interpretado juntamente com outros parâmetros do processo, como temperatura de pirólise e taxa de aquecimento. A interação entre esses parâmetros determina as características físico-químicas do biochar obtido. Assim, a otimização do tempo de residência, deve considerar não apenas o objetivo final do produto, mas também os custos energéticos envolvidos no processo.

3.2 APLICAÇÃO DO BIOCHAR COMO ADSORVENTE

3.2.1 Adsorção e o potencial do biochar

O tratamento de contaminantes emergentes em águas residuais é um dos principais desafios ambientais atualmente. Entre as diversas tecnologias disponíveis, a adsorção tem se destacado, devido à sua eficiência, capacidade de remoção de diversos contaminantes, simplicidade operacional, ausência de subprodutos tóxicos, escalabilidade e baixo custo (CHAUHAN et al., 2022).

O processo de adsorção consiste na adesão de átomos, íons ou moléculas em uma superfície sólida, ocorrendo através de interações físicas ou químicas entre as espécies adsorvidas (adsorvato) e a superfície do adsorvente. Tal processo, pode ocorrer em diferentes interfaces, como líquido-líquido, gás-líquido, gás-sólido ou líquido-sólido, sendo impulsionado por forças de atração entre as moléculas (GÖKIRMAK SÖĞÜT; GÜLCAN, 2023; LÓPEZ; ORTEGA; REGUERA, 2023).

A eficiência do processo de adsorção está fortemente relacionada a área superficial do adsorvente: quanto maior a área, maior tende a ser a capacidade de adsorção. Devido a isso, a utilização de materiais com alta área superficial e presença de sítios ativos são preferíveis. Características físico-químicas, como porosidade, presença de grupos funcionais específicos, estabilidade química e térmica, facilidade de funcionalização e resistência mecânica também desempenham papéis fundamentais na eficiência do adsorvente (RAY; GUSAIN; KUMAR, 2020a)..

Neste contexto, o BC destaca-se por apresentar grande parte dessas propriedades, o que o torna um material altamente promissor para aplicações adsorptivas. Diversos estudos tem demonstrado sua eficácia na remoção de diferentes classes de contaminantes, incluindo metais pesados e fármacos (LÓPEZ; ORTEGA; REGUERA, 2023; RAY; GUSAIN; KUMAR, 2020b). Adicionalmente esses estudos reforçam a importância de compreender não somente os mecanismos de adsorção, mas também a natureza do adsorvente e sua capacidade de recuperação, de modo a evitar impactos ambientais secundários associados à liberação ou acúmulo do próprio material adsorvido no meio após seu uso.

3.2.2 Fatores que influenciam a eficiência de adsorção do biochar

A eficiência do biochar atuar como adsorvente é intrinsecamente ligada as suas propriedades físico-químicas, as quais determinam a forma e a intensidade das interações com os adsorvatos. Dentre essas propriedades, a área superficial e o volume de poros são amplamente destacados pela literatura (PEIXOTO et al., 2022; WEI et al., 2023; YAN et al., 2020), uma vez

que favorecem a adsorção ao disponibilizarem mais sítios ativos, permitindo a retenção de moléculas orgânicas com diferentes tamanhos, através do mecanismo de preenchimento de poros (DONG et al., 2023).

Como exemplo, pode-se citar o estudo de Kumar et al, (2017), que investigaram a adsorção de urânio em biochar obtido da madeira de pinho em diferentes temperaturas. Os resultados mostraram, que o biochar produzido a 700°C apresentou melhores resultados do que o preparado em temperaturas mais baixas. Os autores atribuíram esse comportamento ao aumento da área superficial e do volume de poros, proporcionado pelo maior grau de carbonização nessa condição.

Estudos de Qiu et al., (2021) evidenciam o impacto da presença de grupos funcionais na superfície do biochar. Grupos como carboxila, carbonila, hidroxila e amino favorecem a adsorção de metais pesados por apresentarem boa afinidade com cátions metálicos. Outra propriedade que aumenta a eficiência do biochar como adsorvente de metais pesados é a presença de cargas negativas na sua superfície, pois contribui para a capacidade de troca catiônica, favorecendo a atração eletrostática de íons metálicos.

Com o efeito da temperatura de pirólise, há uma tendência de redução de grupos funcionais de superfície, o que torna o biochar mais hidrofóbico. Esse tipo de superfície favorece a adsorção de moléculas orgânicas não polares por meio da interação hidrofóbica e do mecanismo de partição. Esse processo é considerado o principal mecanismo envolvido na adsorção de poluentes orgânicos sobre estruturas com características gráficas, como as do biochar (AMBAYE et al., 2020; DONG et al., 2023).

Outras propriedades do biochar que interferem em sua eficiência adsorptiva em meio aquoso são o tamanho de partícula e o comportamento coloidal (CHAUBEY et al., 2024). Partículas de tamanho menor, tendem a apresentar maior área superficial específica e maior quantidade de sítios ativos além de se dispersarem melhor, favorecendo a interação com os contaminantes. A dispersão coloidal também impacta nos resultados de adsorção, uma boa dispersão facilita o contato entre adsorvente e adsorbato, ampliando a eficiência do processo (RAMEZANZADEH et al., 2023; SONG et al., 2019). Devido a isso, análises como a distribuição de tamanho de partículas por espelhamento dinâmico de luz (do inglês, *Dynamic Light Scattering* - DLS) e a medição do potencial zeta (PZ) são frequentemente utilizadas, uma vez que o DLS fornece informações sobre o tamanho hidrodinâmico médio das partículas em suspensão e o potencial zeta indica a estabilidade coloidal do sistema. Valores elevados de PZ, sendo eles negativos ou positivos, são associados a maior repulsão eletrostática entre as partículas

e, conseqüentemente, maior estabilidade na dispersão (KEPEKÇI; YENER İLÇE; DEMİR KANMAZALP, 2021).

A análise das propriedades do biochar se faz necessário, uma vez que permite compreender o comportamento do biochar em solução, antecipar seu desempenho e analisar seu desempenho como adsorvente em sistemas aquosos, sobretudo em aplicações ambientais voltadas à remoção de contaminantes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

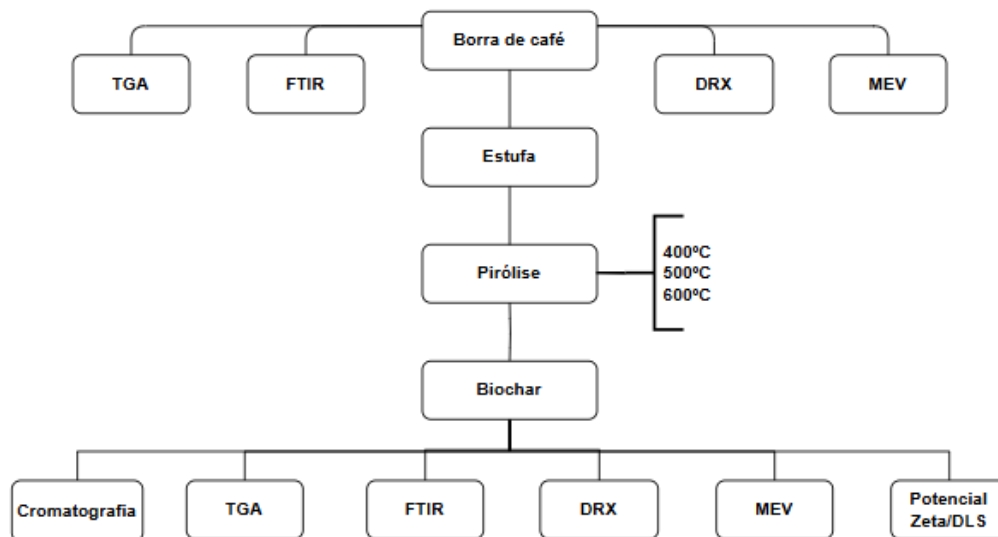
4.1 MATERIAIS

A biomassa utilizada no estudo foi coletada e consistiu de borra de café moído, do tipo catuaí vermelho, 100% arábico. O material foi previamente seco em temperatura ambiente.

4.2 METODOLOGIA UTILIZADA

A Figura 6 apresenta um fluxograma das principais etapas do desenvolvimento do projeto assim como as caracterizações realizadas no decorrer do mesmo.

Figura 6 - Fluxograma das principais etapas



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3 PROCESSAMENTO DO BIOCHAR

Primeiramente, o café foi coado em coador de papel e sem açúcar. A borra obtida foi deixada para secagem natural, ao sol, por três dias. Em seguida, a borra foi colocada em estufa a 60 °C por 72 horas, com o objetivo de eliminar a umidade residual do material. Após esse período, a biomassa seca foi transferida para um cadinho cerâmico (Figura 7) e submetida ao processo de pirólise. As amostras de biochar foram preparadas em um forno tubular de aquecimento (Figura 8), localizado no Departamento de Materiais e Tecnologias da FEG/UNESP.

Figura 7 - Preparação da borra de café para o processo de pirólise.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 8 - Forno tubular com tubo de quartzo utilizado no processo de pirólise.



Fonte: Autoria própria (2025)

Para o processamento dos materiais (Figura 9), foi adotada uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, com temperaturas de pirólise de 400 °C, 500 °C e 600 °C, mantidas por 30 minutos, sob fluxo contínuo de gás nitrogênio a 200 mL/min. Para fins de organização e referência ao longo deste trabalho, as amostras foram nomeadas de acordo com a temperatura de pirólise: BC400, BC500 e BC600.

Figura 9 - Biochar obtido após pirólise da borra de café.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.4 ANÁLISE DE MATERIAL ORGÂNICO

A análise elementar da borra de café foi realizada por meio da contratação de serviço especializado junto ao Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Botucatu. A quantificação dos elementos C, N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Cu, Fe, Mn e Zn seguiu os procedimentos descritos no Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos (MAPA, 2014). Os resultados foram expressos em porcentagem ou em miligramas por quilograma (mg kg^{-1}), conforme a unidade apropriada para cada elemento.

4.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA/DTG)

As análises das propriedades térmicas da borra de café e dos biochars obtidos foram realizadas por meio da técnica de análise termogravimétrica (TGA) e de sua derivada (DTG), a qual permite monitorar a variação da massa em função da temperatura. Essa técnica fornece informações importantes sobre a liberação de compostos voláteis durante a pirólise, a degradação da matéria orgânica e a estabilidade térmica dos resíduos.

A TGA foi empregada com o objetivo de determinar a temperatura de degradação térmica dos materiais e as respectivas perdas de massa associadas. As análises foram realizadas em um equipamento SII Nanotechnology – Seiko, modelo TG/DTA 6200, disponível no Laboratório de Análise Térmica do Departamento de Materiais e Tecnologias (DMT) da FEG/UNESP.

Para a borra de café, os parâmetros adotados foram: atmosfera inerte (nitrogênio), fluxo de gás de 10 mL/min, massa da amostra de aproximadamente 5 mg, taxa de aquecimento de 10 °C/min, faixa de temperatura de 30 a 1000 °C e uso de cadinho de platina.

Para as amostras de biochar, utilizou-se atmosfera oxidativa, com as demais condições experimentais mantidas: fluxo de gás de 10 mL/min, massa de aproximadamente 5 mg, taxa de aquecimento de 10 °C/min, faixa de temperatura de 30 a 1000 °C e cadinho de platina.

4.6 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

As análises químicas desempenham um papel fundamental na caracterização de materiais pois permite a identificação da composição elementar, interações químicas e também a presença de grupos funcionais. A borra de café e o biochar foram caracterizados pela espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier, já que essa técnica proporciona informações sobre os grupos funcionais presentes nas amostras.

A análise por FTIR foi feita em um equipamento Spectrum 100 FTIR spectrometer, marca Perkin Elmer, na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} disponível no Departamento de Física-FEG/UNESP. As amostras foram colocadas em um dessecador por 72 horas para minimizar interferências na leitura. Já a interpretação dos espectros foi realizada com base na literatura, atribuindo-se as bandas características a grupos funcionais típicos de materiais lignocelulósicos, bem como às modificações estruturais decorrentes do processo de pirólise para a formação do biochar.

4.7 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A caracterização estrutural de materiais pode ser realizada por diferentes técnicas, e permitem identificar e caracterizar a composição, organização atômica e estrutura cristalina dos materiais. Para análise estrutural do biochar, a análise por DRX foi utilizada por ser observar o grau de cristalinidade da amostra.

A análise de DRX foi realizada no equipamento D8 Advance da marca Bruker, com detector de linha Lynxeye XE-T 0D e 1D Radiação característica e K alpha Cu = 0.15418, disponível no laboratório de Difractometria de Raios X (LADIF) - FEG/UNESP. Os parâmetros utilizados para análise são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros DRX

Parâmetros	Valores
Intervalo 2θ	05° a 120°
Corrente	25 mA
Tensão	40 KV
Passo	0,05°
Tempo de Contagem	0,35 s
Fenda	0,6 mm
Velocidade de Rotação	10 RPM

Fonte: Autoria própria (2025)

4.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica amplamente utilizada para caracterizar a superfície de materiais, fornecendo informações detalhadas sobre morfologia, forma e tamanho das partículas, porosidade e alterações estruturais decorrentes do seu processamento. Neste trabalho, a borra de café in natura e os biochars obtidos foram caracterizados por MEV, com o objetivo de observar a estrutura porosa, o tamanho e a distribuição dos poros nas amostras.

As análises foram realizadas em um microscópio eletrônico da marca Zeiss, modelo EVO LS 15, disponível no Laboratório de Imagens de Materiais (LAIMat) da FEG/UNESP. Antes da

análise, as amostras foram mantidas em um dessecador, a fim de garantir a remoção de umidade residual. Ressalta-se que não houve processo de moagem, de modo que a avaliação morfológica foi realizada com as amostras em seu estado particulado original.

As análises foram conduzidas em condições de alto vácuo, temperatura ambiente e sem a necessidade de recobrimento metálico. Essa abordagem permitiu a análise direta das superfícies, possibilitando a avaliação das características superficiais e porosidade.

4.9 DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO E POTENCIAL ZETA DE PARTÍCULA

As análises de Distribuição de Tamanho de Partícula e Potencial Zeta foram realizadas com o objetivo de caracterizar o comportamento coloidal das amostras de biochar em suspensão aquosa, uma vez que essas propriedades influenciam diretamente a estabilidade da dispersão e os mecanismos de adsorção. O uso da técnica de Espelhamento Dinâmico de Luz (DLS, do inglês *Dynamic Light Scattering*) permite a determinação do diâmetro hidrodinâmico médio das partículas, baseado no movimento Browniano. Por outro lado, o Potencial Zeta, fornece uma estimativa da tendência de agregação ou repulsão entre as partículas no meio líquido através da carga elétrica na interface sólido-líquido.

As análises foram realizadas em um equipamento ZetaSizer Nano ZS, modelo ZEN 3601, que se encontra no Departamento de Química da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto (FFCLRP). As amostras de biochar foram previamente dispersas em água deionizada sob agitação magnética por 10 minutos seguida de banho ultrassônico por 30 minutos. Após essa etapa, as amostras foram mantidas em repouso por alguns dias para decantação do material particulado de grandes dimensões e as análises foram realizadas com os sobrenadantes. As medições foram feitas em triplicata, à temperatura de 25°C.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com as análises físico-químicas da borra de café e do biochar serão abordados para melhor compreensão das relações do biochar com as propriedades da borra e principalmente seu potencial de aplicação como um adsorvente.

5.1 ANÁLISE DE MATERIAL ORGÂNICO

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise elementar da borra de café utilizada como biomassa neste estudo. Observa-se a presença de teores expressivos de matéria orgânica e carbono orgânico, além da predominância de nitrogênio entre os macronutrientes. Potássio, cálcio, magnésio e enxofre também foram detectados em concentrações compatíveis com resíduos lignocelulósicos conforme relatado por Xu et al., (2017). Esses dados são relevantes para compreensão da composição da biomassa, pois influenciam o processo de pirólise e a composição final do biochar gerado.

Tabela 2 - Caracterização química de amostra de borra de café (ao natural e base seca)

Macronutrientes	Unidade	Borra de Café
Nitrogênio (N)		1,86
Fósforo (P ₂ O ₅)		0,03
Potássio (K ₂ O)	% (ao natural)	0,61
Cálcio (Ca)		0,05
Magnésio (Mg)		0,13
Enxofre (S)		0,04
Composição físico-química		
Umidade	% (ao natural)	19
Matéria orgânica (M.O.)	% (base seca)	77
Carbono orgânico (C.O.)	% (base seca)	52
Relação C/N	-	23/1
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	5,1
Micronutrientes e metais		
Sódio (Na)		49
Boro (B)		-
Cobre (Cu)	mg/Kg (ao natural)	23
Ferro (Fe)		117
Manganês (Mn)		16
Zinco (Zn)		ND

Nota: ND- Não detectado

Fonte: Autoria própria (2025)

5.2 ANÁLISE DE RENDIMENTO

O rendimento da produção do biochar (BC), foi determinado por meio da comparação do peso da borra de café (SCG) antes e após o processo de pirólise para cada amostra e os resultados conforme apresentado na Tabela 3. Conforme pode ser observado, o rendimento do biochar diminui com o aumento da temperatura de pirólise, dados que condizem com a literatura. A amostra BC400 apresentou o maior valor de rendimento (28%), entretanto, esse valor é considerado baixo quando comparado a estudos semelhantes, nos quais, para essa temperatura de pirólise, frequentemente apresenta resultados de 30 e 40% (SURESH BABU et al., 2024; TORCHIA et al., 2022; ZHANG et al., 2020). No caso das amostras BC500 e BC600, os rendimentos observados foram de 23% e 22%, respectivamente. Esses valores estão dentro da faixa reportada na literatura em casos de temperaturas mais elevadas de pirólise, devido a maior degradação dos constituintes da biomassa (LI et al., 2018; SURESH BABU et al., 2024; ZHANG et al., 2020).

Tabela 3 - Dados de rendimento das amostras de biochar para diferentes condições de pirólise

Amostras	Massa Inicial [g]	Massa Final [g]	Rendimento	Média
BC400	25,14	6,81	0,27	28%
	25,15	7,05	0,28	
BC500	25,08	5,93	0,24	23%
	24,40	5,41	0,22	
BC600	25,54	5,01	0,20	22%
	25,95	6,32	0,24	

Fonte: Autoria própria (2025)

5.3 ANÁLISES TÉRMICAS

Por meio da análise de TGA e DTG foi possível observar o comportamento térmico da amostra de SCG e BC400, BC500 e BC600.

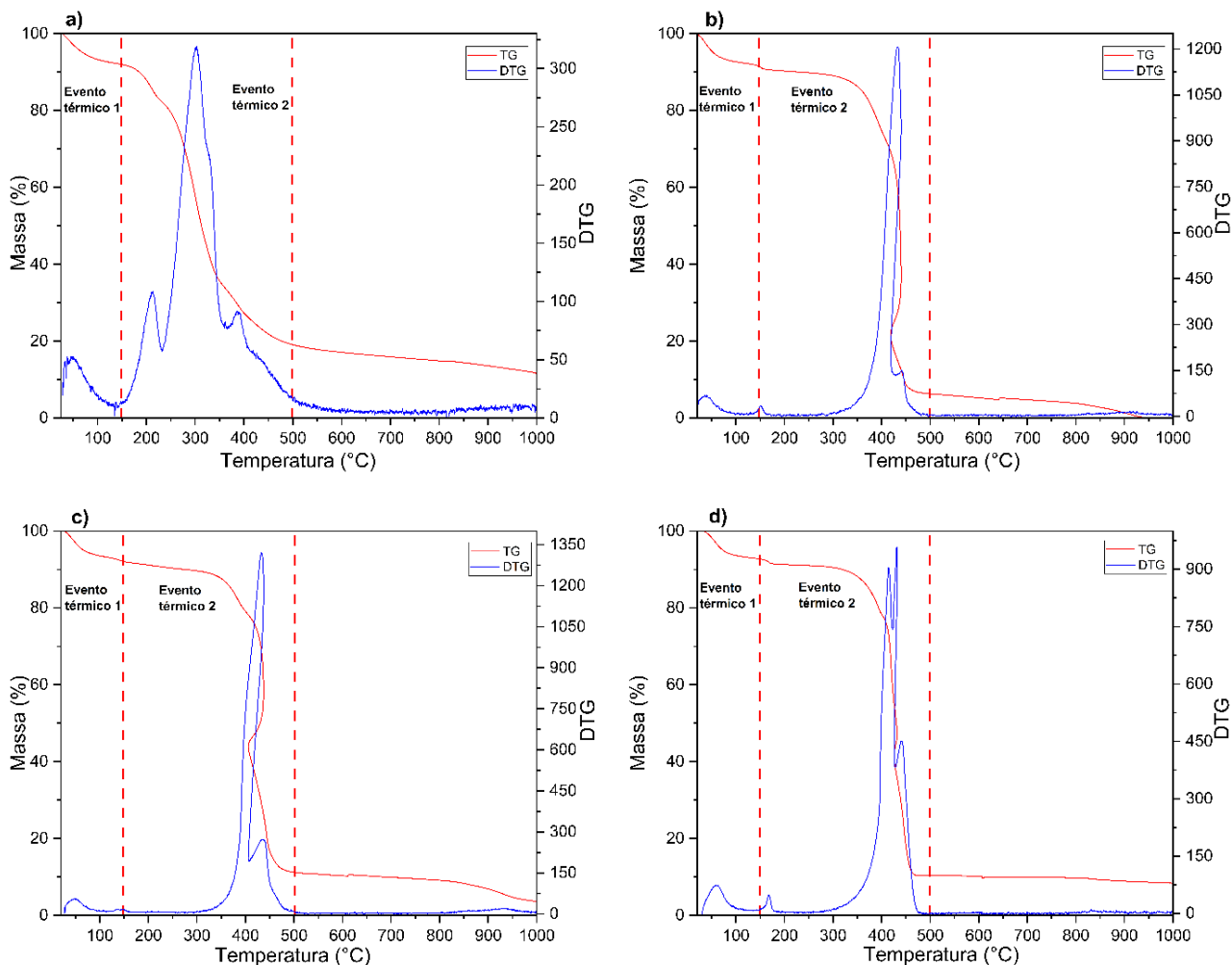
Para a amostra de SCG (Figura 10a), o primeiro evento térmico, entre 20°C e aproximadamente 150°C, com perda de massa atribuída a perda de umidade e remoção liberação de voláteis de baixa massa molar (BRACHI; SANTES; TORRES-GARCIA, 2021).

No segundo evento, observa-se um conjunto de etapas de degradação: a decomposição de compostos orgânicos voláteis (COVs) por volta de 200 °C, seguida pela degradação da hemicelulose (200–300 °C), celulose (300–400 °C) e lignina (acima de 400 °C). Nessa faixa de temperatura (200–400 °C), também ocorre a decomposição de proteínas, carboidratos, ácidos

graxos e outros constituintes orgânicos presentes na borra de café. Essa região é responsável pela maior variação de massa da amostra, com perda de aproximadamente 73%. Ao final do processo, observa-se uma massa residual de cerca de 11% a 1000 °C, indicando a fração resistente à degradação térmica.

Nas amostras de biochar, os resultados de comportamento térmico foram bastante semelhantes entre elas, conforme foram observados nas Figura 10b, c e d. A variação de massa no primeiro evento térmico, cerca de 9%, 8% e 7% em peso par o BC400, BC500 e BC600 respectivamente, pode também ser atribuída a perda umidade. No segundo evento térmico, ao se comparar com a amostra SCG, verifica-se a ausência de um pico a 200°C. Essa ausência pode ser justificada pelo processo de pirólise adotado, onde o mesmo promoveu a decomposição total dos COVs (BRACHI; SANTES; TORRES-GARCIA, 2021), além disso, os eventos de decomposição começam ocorrer em aproximadamente 400°C. Essa mudança na temperatura comparada a borra de café pode ser justificada pela maior concentração de lignina do que dos demais componentes, uma vez que ela é a mais resistente a quebra das suas ligações e tem entre 400 e 500°C uma decomposição mais intensa (ALVES et al., 2019; BRACHI; SANTES; TORRES-GARCIA, 2021; DE SOUZA et al., 2022). Nessa região, ocorre a variação de massa mais acentuada para as amostras, exibindo um teor de 85% para o BC400, 81% para o BC500 e 83% para o BC600 em peso. Já o final do processo, tem-se uma variação de massa menos acentuada e mais prolongada obtendo-se massa residual de 0%, 3% e 8% em peso, calculada a 900°C, para as amostras de BC400, BC500 e BC600 respectivamente.

Figura 10 - Análises térmicas TGA e DTG das amostras: a)SCG, b)BC400, c)BC500 e d)BC600



Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 4 apresenta a síntese dos resultados obtidos nas análises térmicas (TG/DTG) das amostras estudadas. São indicados os principais eventos térmicos observados, as respectivas variações de massa associadas a cada evento e a massa residual remanescente de cada amostra. Esses dados permitem compreender as características de decomposição térmica dos materiais analisados.

Tabela 4 – Eventos térmicos e variação de massa do SCG e BC em diferentes temperaturas avaliados por análise termogravimétrica (TGA).

Amostras	Evento térmico	Faixa de temperatura (°C)	Variação de massa (%)	Massa residual (% e T _{calculada})
SCG	1	20-150	8	11 (1000 °C)
	2	150-500	73	
BC400	1	20-150	9	0 (900 °C)
	2	150-500	85	
BC500	1	20-150	8	3 (900 °C)
	2	150-500	81	
BC600	1	20-150	7	8 (900°C)
	2	150-500	83	

Fonte: Autoria própria (2025).

5.4 ANÁLISE ESTRUTURAL

5.4.1 Espectroscopia de infravermelho por transformada de fourier (FTIR)

A presença de grupos funcionais e a mudança gerada na superfície das amostras de biochar, assim como da SCG, foram examinados por FTIR (Figura 11). De modo geral, os resultados de FTIR mostram que os grupos funcionais presentes nas amostras diminuem à medida que a temperatura de pirólise aumenta. O pico de estiramento O-H em torno de 3300cm^{-1} , o qual é visível na SCG, diminuiu drasticamente para o biochar em todas as condições de pirólise, representando a desidratação da celulose.

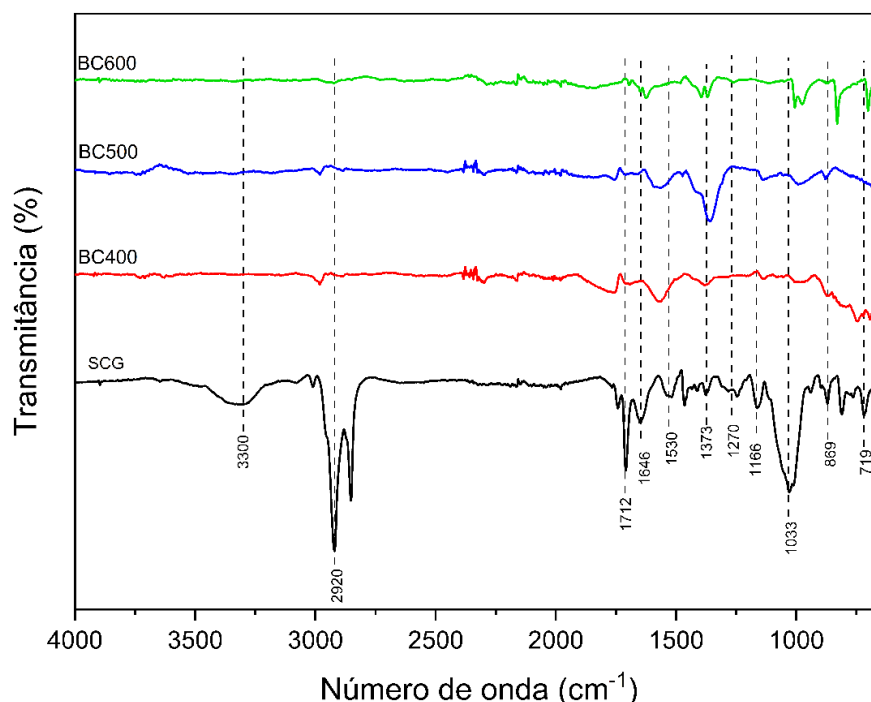
Para as amostras SCG, as bandas em aproximadamente $2920\text{-}2855\text{cm}^{-1}$, são atribuíveis ao grupo CH_2 , indicando a presença de estruturas alifáticas. Essas bandas foram relatadas anteriormente em espectros de amostra de café Arábica e Robusta por Ballesteros et al. (2014a). Nas amostras de biochar, em todas as condições de pirólise realizadas, foi observado que esses estiramentos também diminuíram para quase zero, possivelmente devido à quebra das ligações C-H menos estáveis (DE SOUZA et al., 2022).

Na amostra de SCG em 1712cm^{-1} , as bandas resultantes do alongamento do grupo cetona (C=O) são altamente associadas a cafeína (BALLESTEROS; TEIXEIRA; MUSSATTO, 2014a; LI; CHEN, 2018), e, comparado as amostras de BC, ocorreu uma diminuição significativa. As bandas de flexão dos grupos C-H e O-H, indicativos da presença de lignina, encontram-se nas regiões de $1567\text{-}1373\text{cm}^{-1}$ e $1270\text{-}1166\text{cm}^{-1}$ respectivamente. As vibrações de estiramento das ligações duplas carbono-carbono (C=C) foram identificadas em 1646cm^{-1} , na amostra de SCG, esse estiramento foi diminuindo com o aumento da temperatura, uma vez que ocorre maior disponibilidade de energia para quebra das ligações (CHEN et al., 2012; ELNOUR et al., 2019).

As bandas de flexão dos grupos indicativos da presença de lignina C-H metil e metileno, encontram-se nas regiões de $1530-1373\text{cm}^{-1}$ para a SCG, $1576-1366\text{cm}^{-1}$ para BC400 e BC500 e $1622-1366\text{cm}^{-1}$ para o BC600. Outro grupo indicativo de lignina é o O-H, cujo encontra-se nas regiões de $1270-1166\text{cm}^{-1}$ para a amostra de SCG. Já a banda intensa que ocorre em 1033cm^{-1} é característica do alongamento de grupos éster (C-O-C) presente na celulose e hemicelulose (BALLESTEROS; TEIXEIRA; MUSSATTO, 2014b; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020). Por fim, as bandas localizadas em 867-719 podem ser atribuídas às ligações C-H de estruturas aromáticas. A presença de grupos orgânicos nas amostras de biochar nas temperaturas de pirólise mais altas pode estar associadas ao elevado teor de cinzas. Esses resíduos inorgânicos apresentam maior estabilidade térmica e podem atuar como uma barreira para proteger os compostos orgânicos da completa degradação. Além disso, a presença de cinzas pode dificultar a formação de estruturas aromáticas conforme aumento da carbonização (DOMINGUES et al., 2017).

A presença desses grupos funcionais residuais (O-H, C=O, C=C e ésteres), aliada a porosidade do biochar, é essencial para sua aplicação como adsorvente de medicamentos. Uma vez que eles permitem a formação de interações específicas com as moléculas do composto farmacêutico, incluindo ligações de hidrogênio e interações $\pi-\pi$, determinando a capacidade de adsorção do material.

Figura 11 - Espectros de FTIR das amostras de borra de café e biochar em diferentes temperaturas.



A Tabela 5 compila as principais bandas de absorção identificadas nos espectros do FTIR, bem como suas respectivas atribuições aos grupos funcionais, resumindo os dados previamente discutidos e permitindo uma visão mais clara das alterações decorrentes do processo de pirólise.

Tabela 5 - Vibrações características da caracterização por FTIR

SCG [cm ⁻¹]	BC400 [cm ⁻¹]	BC500 [cm ⁻¹]	BC600 [cm ⁻¹]	Grupo Funcional
3300	-	-	-	Alongamento O-H de grupos hidroxila
2920	-	-	-	Alongamento CH ₂
1712			1697	Alongamento C=O
1646			1625	Deformação alifática; C=C
1530-1373	1576-1366	1576-1366	1622-1366	Alongamento O-H
1270-1166				Alongamento C-H
1033	-	995	995	Alongamento C-O-C
869-719			829-697	C-H aromático

Fonte: Autoria própria (2025)

5.4.2 Difração de Raios X (DRX)

Os difratogramas de DRX das amostras de SCG e BC400, BC500 e BC600 são apresentados na Figura 12. O espectro da SCG apresentou semelhança com o espectro de componentes lignocelulósicos conforme a literatura (BALLESTEROS; TEIXEIRA; MUSSATTO, 2014a; DEHKHODA; ELLIS; GYENGE, 2014; MACIEL; AREIAS; HOLANDA, 2023), indicando a existência de regiões cristalinas e, confirmando a natureza orgânica do resíduo. A celulose possui regiões amorfas e cristalinas e, o pico cristalino presente na amostra de SCG é atribuído à estrutura típica da celulose I β (monoclínica) (BALLESTEROS; TEIXEIRA; MUSSATTO, 2014b).

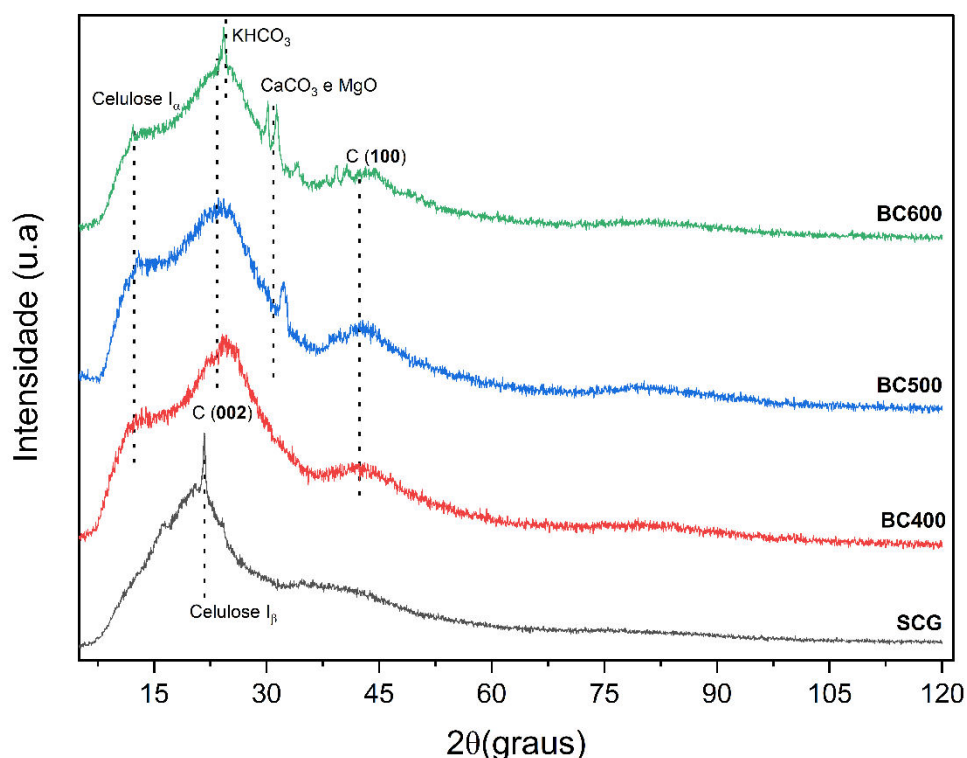
Nas amostras de BC, observa-se um pico característico associado às estruturas amorfas, com uma banda difusa e centrada em aproximadamente $2\Theta = 25^\circ$. Os picos largos em torno de 25° e 45° correspondem respectivamente, às reflexões dos planos (002) e (100) típicos da fase turbostrática do carbono. Essa fase turbostrática ocorre durante o processo de pirólise, devido a degradação termoquímica da celulose, hemicelulose e lignina em elevadas temperaturas, promovendo a liberação de voláteis e a condensação progressiva de anéis aromáticos. Esses anéis

passam a se organizar em folhas aromáticas bidimensionais, semelhantes a do grafeno, que vão se empilhando parcialmente ao longo do eixo z, mas sem a tridimensionalidade perfeita do grafite (BALLESTEROS; TEIXEIRA; MUSSATTO, 2014b; PUSCEDDU, 2017). O aumento da temperatura de pirólise favorece o crescimento dessas folhas e também a intensificação das reflexões (002) e (100), como pode ser observado na amostra BC600, indicando o desenvolvimento da estrutura do carbono, embora ainda predominem regiões amorfas na matriz do BC.

O pico presente em $2\Theta \approx 12^\circ$, em todas as amostras de BC, é indicativo da presença de celulose I α (triclínica) característica remanescente da borra de café. Na amostra BC600, o pico localizado em aproximadamente $2\Theta = 24^\circ$ pode estar associado à presença de compostos contendo potássio, possivelmente na forma de sais como o bicarbonato de potássio (KHCO_3), uma vez que esse elemento foi detectado em maior proporção na análise elementar da borra de café. Adicionalmente, os picos em $2\Theta = 30$ e 31° identificados nas amostras de BC500 e BC600 podem ser atribuídos a compostos inorgânicos como carbonato de cálcio (CaCO_3) e óxido de magnésio (MgO) (FERNÁNDEZ et al., 2023; LIU et al., 2012). A ocorrência desses picos inorgânicos possivelmente está relacionada ao aumento do teor de cinzas causado pela pirólise em maiores temperaturas, uma vez que, os compostos inorgânicos como K, P, Ca e Mg se acumulam no sólido residual após a volatilização dos compostos C, O e H (FONA et al., 2024). Neste contexto, a presença dos picos cristalinos detectados nas amostras de BC500 e BC600 pode ser explicada pela concentração progressiva desses minerais, originalmente presentes na borra de café.

A predominância da estrutura amorfa, combinada com a presença de minerais inorgânicos pode contribuir para a eficiência de aplicação do biochar como adsorvente. A matriz amorfa aumenta a acessibilidade de poros e sítios ativos, enquanto os compostos inorgânicos podem atuar como pontos de ligação adicionais, potencializando a capacidade de adsorção do material.

Figura 12 - Difratomogramas de raios X (DRX) da borra de café e biochars obtidos em diferentes temperaturas.



Fonte: Autoria própria (2025)

5.5 ANALISE MORFOLÓGICA

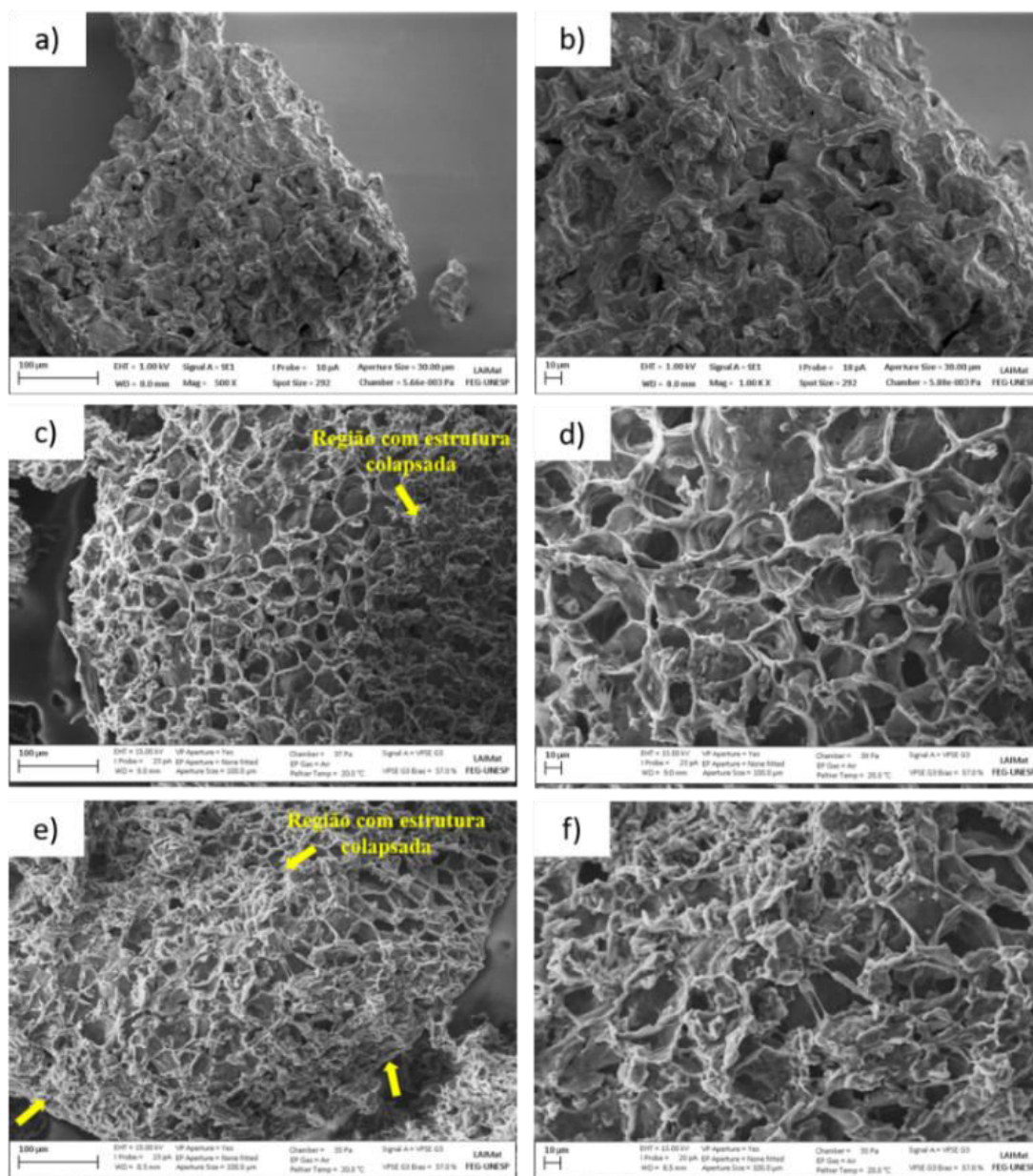
A Figura 13, apresenta as micrografias da SCG e amostras de BC400 e BC500, possibilitando a análise das alterações microestruturais decorrentes do processo de pirólise. A amostra de SCG (Figura 13a, b), verifica-se uma superfície irregular, rugosa e baixa porosidade, o que condiz com estudos anteriores (AFOLABI; SOHAIL; CHENG, 2020; YANG et al., 2023). A superfície densa da borra de café se justifica pela presença de alta quantidade de compostos moleculares orgânicos em sua estrutura (LEE et al., 2022).

Para o BC400 (Figura 13c e d), destaca-se uma morfologia porosa, com cavidades interconectadas e com estruturas de favo de mel incompletas na maior parte da superfície. Essa estrutura indica que ocorreu uma preservação das paredes celulares da biomassa após a pirólise (PANG et al., 2023; SERTOLI et al., [s.d.]). No entanto, ainda é possível observar regiões da partícula em que a estrutura se encontra corrompida e sem formação de poros bem definidos.

A amostra BC500 (Figura 13e, f) apresentou uma estrutura intermediária quando comparada com o BC400 e o BC600, sendo possível observar uma redução na quantidade de poros interconectados. O colapso das paredes celulares e consequente diminuição das cavidades

ocorreu de forma mais pronunciada e se tornou mais evidente na morfologia da amostra. Como resultado, observa-se uma superfície mais compacta, desordenada e com poros menos definidos.

Figura 13 - Micrografias de MEV das amostras de SCG e biochars obtidos a 400 °C e 500 °C. (a–b) SCG: 500× e 1000×; (c–d) BC400: 500× e 1000×; (e–f) BC500: 500× e 1000×.



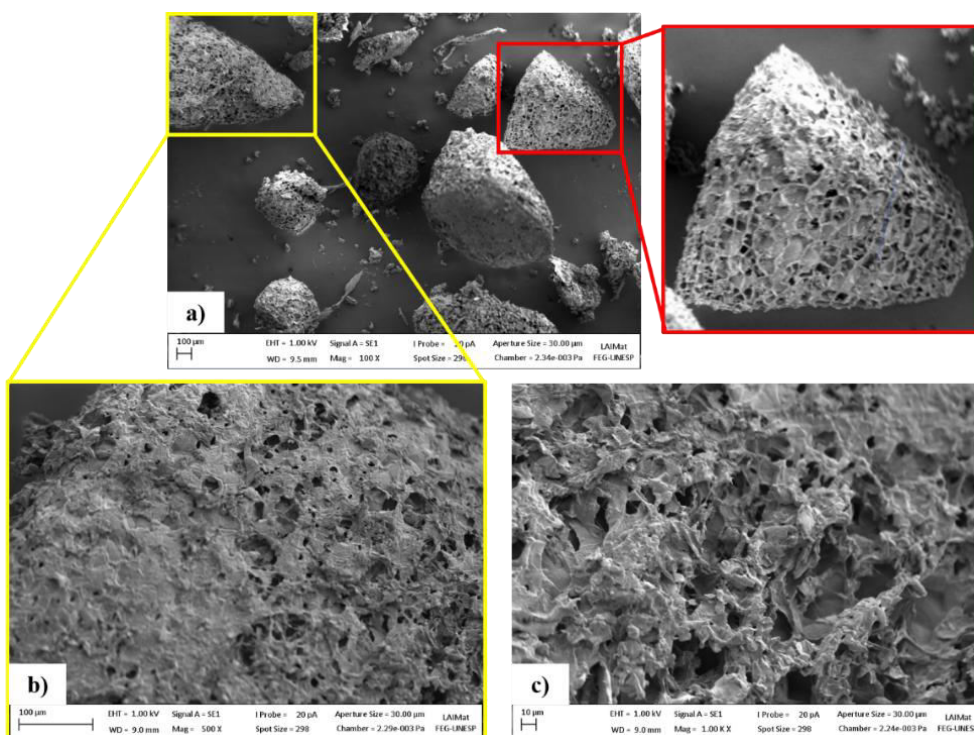
Fonte: Autoria própria (2025)

A amostra BC600 (Figura 14), apresentou uma morfologia ainda mais desordenada em comparação às demais amostras. Embora seja possível observar, na ampliação de 100x (Figura 14a), a presença de poros em uma das partículas, mesmo que alguns deles parcialmente obstruídos, a maior parte da amostra não exibiu poros bem definidos (Figura 14c e d), indicando uma maior ocorrência de colapso da estrutura celular. Essa reorganização estrutural, pode ter

favorecido a formação de macroporos devido ao colapso superficial, ao mesmo tempo que a formação de microporos na estrutura mais interna conforme relatado por (WEI; LU, 2021).

As morfologias observadas nas amostras BC500 e BC600 podem estar relacionadas às condições do processo termoquímico em altas temperaturas, que promovem um grau mais acelerado e intensificado de carbonização (ELNOUR et al., 2019), bem como a um maior acúmulo de cinzas na superfície do biochar, resultando, conseqüentemente, na obstrução dos poros (EMRAN et al., 2024; FERNANDES et al., 2020; WYSTALSKA; GROSSER, 2024).

Figura 14 - Estrutura morfológica da amostra BC600 observada por MEV em diferentes ampliações.



Fonte: Autoria própria (2025)

Com base nos resultados das micrografias obtidas, foi possível realizar uma quantificação do diâmetro médio de poros das amostras de biochar através do software ImageJ. Os valores obtidos, juntamente com seus respectivos desvios padrão, são apresentados na Tabela 6. Os resultados mostram as amostras de biochar predominantemente macroporos e, que houve um aumento progressivo do diâmetro médio dos poros com o aumento da temperatura de pirólise, assim o BC600 apresentou os maiores poros médios. Esses dados correspondem a estudos anteriores feitos por Islam et al.,(2024), onde as amostras apresentaram maior tamanho de poros com o aumento da temperatura e menor área de superfície. A amostra de BC600 apresentou

também, maior desvio padrão entre os valores de diâmetro de poros, o que indica uma maior heterogeneidade na distribuição dos tamanhos de poros. Esse resultado pode estar associado à estrutura superficial colapsada visualizada nos resultados do MEV.

Tabela 6 - Tamanho de poro médio das amostras de BC.

Amostra	Tamanho médio dos poros [μm]	Desvio Padrão
BC400	37,86	7,37
BC500	39,78	9,49
BC600	43,12	14,68

Fonte: Autoria própria (2025).

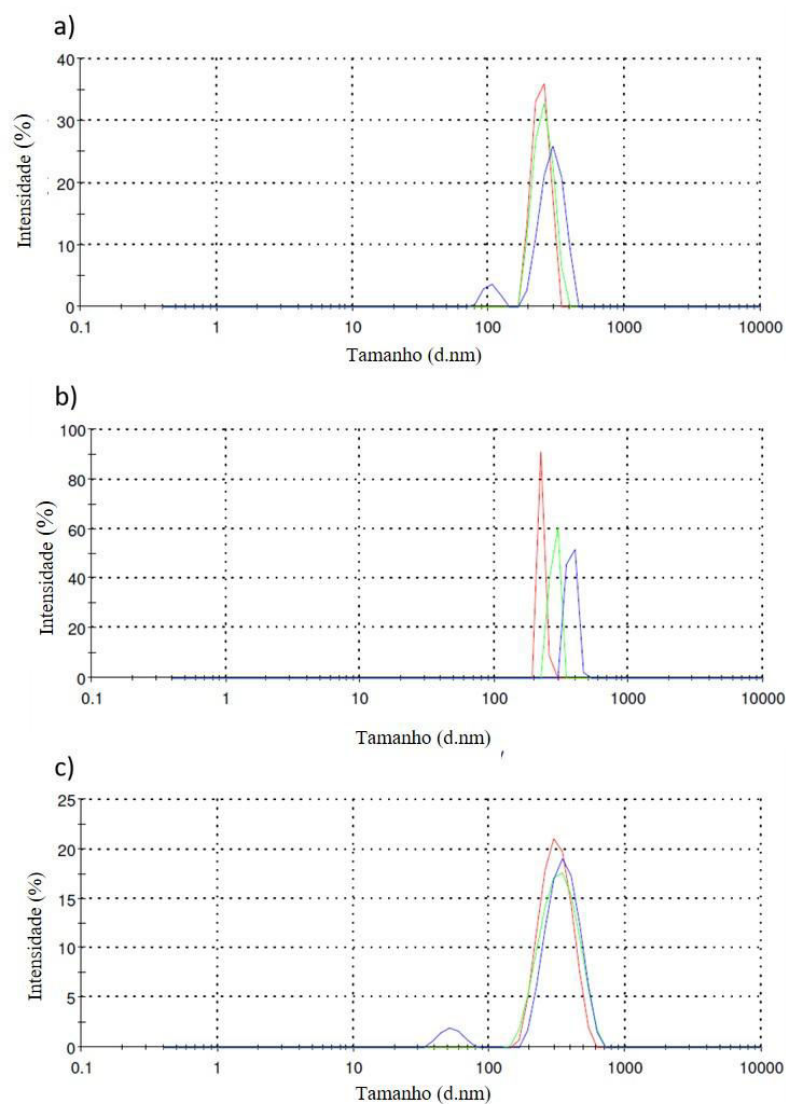
5.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE SUPERFÍCIE

As análises de Potencial Zeta e Tamanho de Partícula foi realizada exclusivamente para as amostras de biochar, uma vez, que essas propriedades eletrocinéticas e coloidais se tornam mais relevantes após o processo de carbonização. A pirólise promove alterações significativas na composição química, morfologia e carga superficial da biomassa, modificando seu comportamento em suspensão e interação com adsorvatos. Dessa forma, as análises na borra de café não refletiriam com precisão os parâmetros que influenciam na capacidade adsortiva do biochar, tornando sua análise, menos pertinente aos objetivos propostos neste trabalho.

5.6.1 Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS)

A caracterização do tamanho hidrodinâmico das amostras foi realizada por DLS, com as medições realizadas em triplicata. A Figura 15 apresenta as sobreposições dos espectros de distribuição obtidos para as três amostras de BC. Ao se analisar a distribuição por intensidade, as amostras de BC400 e BC600 apresentaram múltiplos picos em uma das replicatas, sugerindo a coexistência de diferentes populações de partículas na suspensão.

Figura 15 - Distribuição do tamanho de partículas por DLS para as amostras de biochar: (a) triplicata BC400; (b) triplicata BC500; (c) triplicata BC600



Fonte: Aatoria própria (2025)

A Tabela 7 apresenta os resultados médios das triplicatas para cada amostra de biochar. Os valores de Z-Average (tamanho hidrodinâmico médio) indicam uma tendência de redução de tamanho médio das partículas com o aumento da temperatura de pirólise, ao se comparar as amostras de BC400 e BC600. Porém ao se analisar o contexto geral, a amostra BC500 foi a que apresentou o maior valor médio de Z-Average (1181,67 d. nm). Esse comportamento pode estar associado a uma maior tendência de agregação das partículas, que se justifica pelo valor de PDI (índice de polidispersão), pois essa amostra, apresentou o maior valor ($0,823 \pm 0,15$), evidenciando uma distribuição de tamanho mais heterogênea e, possivelmente, a presença de aglomerados.

As amostras de BC400 e BC600, apresentaram menores valores de PDI, $0,559 \pm 0,03$ e $0,425 \pm 0,01$ respectivamente, indicando maior homogeneidade na distribuição de tamanhos. Segundo a literatura (MUDALIGE et al., 2019), valores de PDI $< 0,5$ sugerem uma boa uniformidade no tamanho de partículas, e maiores que 0,7, elevada polidispersidade. Essa uniformidade no tamanho das partículas favorece a estabilidade coloidal da suspensão e pode contribuir para um desempenho mais previsível em aplicações de adsorção, devido ao menor efeito de agregação, fato que dificulta o acesso a superfícies ativas do biochar pelo contaminante.

Tabela 7 - Resumo dos resultados de tamanho de partículas por DLS para as amostras analisadas

Amostra	Z-Average médio (d.nm)	Desvio Padrão do Z-Average (d.nm)	PdI Médio	Desvio Padrão do PdI
BC400	624,10	11,86	0,559	0,03
BC500	1181,67	92,52	0,823	0,15
BC600	346,10	7,76	0,425	0,01

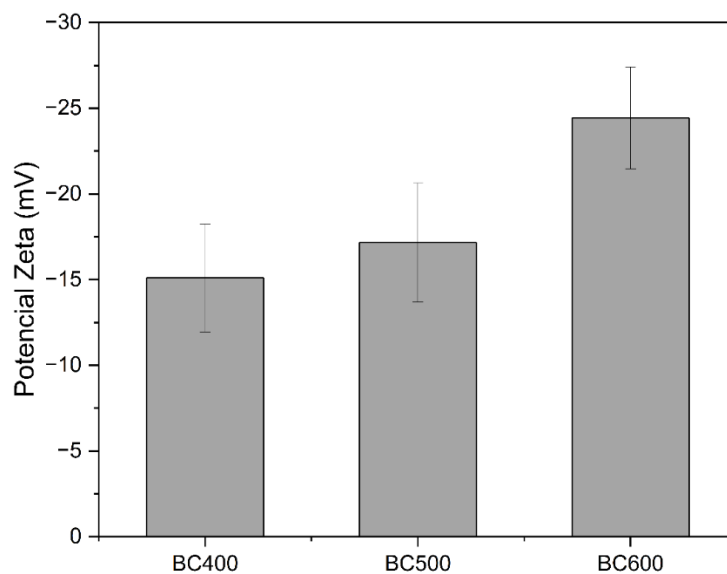
Fonte: Aatoria própria (2025)

5.6.2 Potencial Zeta

Os valores obtidos de Potencial Zeta (PZ) das amostras de biochar Figura 16, mostraram uma tendência clara com o aumento da temperatura de pirólise, com as amostras apresentando uma média de -15,1mV, -17mV e -24,4mV para o BC400, BC500 e BC600 respectivamente. Valores próximos a zero indicam tendência à agregação, enquanto valores superiores a ± 30 mV, sugerem elevada estabilidade eletrostática (KEPEKÇI; YENER İLÇE; DEMIR KANMAZALP, 2021) Embora nenhuma das amostras tenha atingido o valor de -30mV, o BC600 apresentou maior tendência a estabilidade, e ao se comparar com as outras amostras, os dados indicam um aumento na estabilidade coloidal das partículas com o aumento da temperatura de pirólise, visto que valores mais negativos correspondem a maior repulsão eletrostática entre partículas, dificultando a aglomeração.

O desvio padrão associado aos valores de PZ também diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise. A maior variação encontrada, foi na amostra de BC400 o que pode indicar instabilidade ou heterogeneidade no processo de dispersão da amostra.

Figura 16 - Potencial Zeta médio das amostras BC400, BC500 e BC600.



Fonte: Autoria própria (2025)

A correlação entre os dados de DLS e PZ permite uma análise integrada das propriedades coloidais das amostras de biochar. A amostra de BC500 apresentou o maior valor de Z-Average, o que indica que a amostra teve partículas com maior diâmetro médio em suspensão, mas essa amostra também apresentou um valor de PZ mais negativo que a amostra de BC400, sugerindo maior estabilidade coloidal. Já a amostra BC600, apresentou um PZ mais negativo e valor de Z-Average menor, indicando maior estabilidade e um tamanho médio de partícula menor, possivelmente devido a fragmentação mais intensa e colapso estrutural das partículas.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, avaliou-se a viabilidade de utilização da borra de café como matéria-prima para a produção de biochar por pirólise controlada, com ênfase na caracterização físico-química do material e na análise de seu potencial para aplicações ambientais e biomédicas, especialmente como adsorvente.

A pirólise conduzida nas temperaturas de 400 °C, 500 °C e 600 °C resultou em rendimentos decrescentes de biochar, evidenciando o efeito direto da temperatura na conversão térmica da biomassa. A análise termogravimétrica indicou que a maior parte da degradação ocorre em torno de 400 °C. A espectroscopia no infravermelho (FTIR) revelou a redução de grupos funcionais oxigenados com o aumento da temperatura, refletindo mudanças químicas relevantes para a adsorção de moléculas farmacêuticas. Os difratogramas de raios X (DRX) indicaram estrutura predominantemente amorfa e turbostrática, característica que contribui para a estabilidade e a porosidade do material.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou a formação de poros e alterações na morfologia superficial em função da temperatura de processamento. As análises coloidais, realizadas por espalhamento dinâmico de luz (DLS), mostraram redução do diâmetro hidrodinâmico médio com o aumento da temperatura. O potencial zeta apresentou valores negativos em todas as amostras, sendo mais acentuado no biochar obtido a 600 °C, o que favorece a disposição de uniforme em soluções e a disponibilidade de sítios ativos para a adsorção de fármacos.

Os resultados indicam que a borra de café, resíduo amplamente disponível e pouco aproveitado, pode ser convertida em biochar com propriedades físico-químicas ajustáveis por meio da pirólise. O material obtido a 600 °C apresentou melhor combinação de morfologia, química e estabilidade coloidal, sendo o mais promissor para aplicação como adsorvente de medicamentos em sistemas líquidos. Além disso, a correlação observada entre os parâmetros de pirólise, composição química e propriedades coloidais fornece uma base sólida para otimização futura do material.

Embora não tenham sido realizados testes de adsorção ou avaliações biológicas, os dados obtidos fornecem suporte técnico consistente para investigações futuras voltadas ao desenvolvimento de biomateriais funcionais com potencial de uso em contextos ambientais e da saúde.

6.1 SUGESTÃO DE ESTUDOS FUTUROS:

Para a continuidade deste estudo e aprofundamento da caracterização do biochar obtido da borra de café, sugere-se:

- A realização de análise de Brunauer-Emmett-Teller (BET), visando à determinação da área da superfície \ específica e à avaliação da distribuição de tamanho e volume de poros;
- A aplicação de espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS), para investigar a composição química e os estados de oxidação dos elementos presentes na superfície do biochar;
- A utilização de técnicas cromatográficas, como cromatografia líquida ou gasosa, para detecção de compostos orgânicos residuais ou substâncias voláteis oriundas da pirólise;
- A avaliação da estabilidade coloidal do biochar em diferentes faixas de pH, com o objetivo de simular condições variáveis de aplicação em meios aquosos.

Essas análises complementares contribuirão para um entendimento mais aprofundado das propriedades superficiais e da reatividade do biochar, ampliando as possibilidades de aplicação em sistemas ambientais e biomédicos.

- Análise da estabilidade coloidal em diferentes pH.

REFERÊNCIAS

AFOLABI, O. O. D.; SOHAIL, M.; CHENG, Y. L. Optimisation and characterisation of hydrochar production from spent coffee grounds by hydrothermal carbonisation. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1380–1391, 1 mar. 2020.

AHMED, H. et al. Toward Circular Economy: Potentials of Spent Coffee Grounds in Bioproducts and Chemical Production. **Biomass 2024, Vol. 4, Pages 286-312**, v. 4, n. 2, p. 286–312, 12 abr. 2024.

AIB, H.; PARVEZ, M. S.; CZÉDLI, H. M. Pharmaceuticals and Microplastics in Aquatic Environments: A Comprehensive Review of Pathways and Distribution, Toxicological and Ecological Effects. **International Journal of Environmental Research and Public Health 2025, Vol. 22, Page 799**, v. 22, n. 5, p. 799, 20 maio 2025.

AL-RUMAIHI, A. et al. A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112715, 1 out. 2022.

ALVES, A. C. F. et al. Activated carbon produced from waste coffee grounds for an effective removal of bisphenol-A in aqueous medium. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 24, p. 24850–24862, 2019.

AMALINA, F. et al. Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications – A review. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 7, p. 100134, 1 ago. 2022.

AMBAYE, T. G. et al. Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. **International Journal of Environmental Science and Technology 2020 18:10**, v. 18, n. 10, p. 3273–3294, 26 dez. 2020.

ANDRADE, T. S. et al. Biochar obtained by carbonization of spent coffee grounds and its application in the construction of an energy storage device. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 4, p. 100061, 15 dez. 2020.

BALLESTEROS, L. F.; TEIXEIRA, J. A.; MUSSATTO, S. I. Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 12, p. 3493–3503, 1 dez. 2014a.

BALLESTEROS, L. F.; TEIXEIRA, J. A.; MUSSATTO, S. I. Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 12, p. 3493–3503, 1 dez. 2014b.

BARSZCZ, W.; ŁOŻYŃSKA, M.; MOLENDĄ, J. Impact of pyrolysis process

conditions on the structure of biochar obtained from apple waste. **Scientific Reports 2024 14:1**, v. 14, n. 1, p. 1–11, 7 maio 2024.

BASU, P. Pyrolysis. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**, p. 155–187, 1 jan. 2018.

BENYEKKOU, N. et al. Elimination of paracetamol from water by a spent coffee grounds biomaterial. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 14, p. 100396, 1 dez. 2020.

BRACHI, P.; SANTES, V.; TORRES-GARCIA, E. Pyrolytic degradation of spent coffee ground: A thermokinetic analysis through the dependence of activation energy on conversion and temperature. **Fuel**, v. 302, p. 120995, 15 out. 2021.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 1 mar. 2012.

CHAUBEY, A. K. et al. Definitive Review of Nanobiochar. **ACS Omega**, v. 9, n. 11, p. 12331, 2024.

CHAUHAN, S. et al. Biochar-mediated removal of pharmaceutical compounds from aqueous matrices via adsorption. **Waste Disposal & Sustainable Energy 2022 5:1**, v. 5, n. 1, p. 37–62, 16 dez. 2022.

CHEN, Y. et al. Biomass-based pyrolytic polygeneration system on cotton stalk pyrolysis: Influence of temperature. **Bioresource Technology**, v. 107, p. 411–418, 1 mar. 2012.

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

CROSS, A.; SOHI, S. P. A method for screening the relative long-term stability of biochar. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 215–220, 1 mar. 2013.

CZAJCZYŃSKA, D. et al. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 3, p. 171–197, 1 set. 2017.

DE SOUZA, L. Z. M. et al. Ecotoxicological Effects of Biochar Obtained from Spent Coffee Grounds. **Materials Research**, v. 25, p. e20220013, 21 nov. 2022.

DEHKHODA, A. M.; ELLIS, N.; GYENGE, E. Electrosorption on activated biochar: Effect of thermo-chemical activation treatment on the electric double layer capacitance. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 44, n. 1, p. 141–157, 1 jan. 2014.

DOMINGUES, R. R. et al. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, p. 1–19, 2017.

DONG, M. et al. Biochar for the Removal of Emerging Pollutants from Aquatic Systems:

A Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health** **2023**, Vol. **20**, Page **1679**, v. 20, n. 3, p. 1679, 17 jan. 2023.

EL-SHAFIE, A. S. et al. Removal of antibiotics from aqueous solutions: insights of competitive adsorption onto Ni-impregnated biochar of spent coffee grounds. **Applied Water Science**, v. 14, n. 9, p. 1–25, 1 set. 2024.

ELNOUR, A. Y. et al. Effect of Pyrolysis Temperature on Biochar Microstructural Evolution, Physicochemical Characteristics, and Its Influence on Biochar/Polypropylene Composites. **Applied Sciences** **2019**, Vol. **9**, Page **1149**, v. 9, n. 6, p. 1149, 18 mar. 2019.

EMBRAPA. **Região Sudeste produz 86% dos Cafés do Brasil na safra 2023 - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/85917934/regiao-sudeste-produz-86-dos-cafes-do-brasil-na-safra-2023>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

EMRAN, M. et al. A novel solar disk chamber reactor for agricultural waste recycling and biochar production. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 26, n. 2, p. 467–479, 1 fev. 2024.

FERNANDES, B. C. C. et al. Impact of Pyrolysis Temperature on the Properties of Eucalyptus Wood-Derived Biochar. **Materials** **2020**, Vol. **13**, Page **5841**, v. 13, n. 24, p. 5841, 21 dez. 2020.

FERNÁNDEZ, J. V. et al. Use of Unmodified Coffee Husk Biochar and Ashes as Heterogeneous Catalysts in Biodiesel Synthesis. **Bioenergy Research**, v. 16, n. 3, p. 1746–1757, 1 set. 2023.

FERREIRA, L. T.; CAVATON, T. **Artigo - Europa consome aproximadamente 150 mil sacas de cafés por dia - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/101610401/artigo---europa-consome-aproximadamente-150-mil-sacas-de-cafes-por-dia>>. Acesso em: 18 jul. 2025.

FONA, Z. et al. Physico-chemical characteristics of coffee parchment and its combustion residue to delineate the components required for gasification catalyst. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 10, p. 100991, 1 dez. 2024.

GHANI, W. A. W. A. K. et al. Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: Chemical and physical characterization. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 18–24, 1 jan. 2013.

GÖKIRMAK SÖĞÜT, E.; GÜLCAN, M. Adsorption: basics, properties, and classification. **Adsorption through Advanced Nanoscale Materials: Applications in Environmental Remediation**, p. 3–21, 1 jan. 2023.

HAMA AZIZ, K. H. et al. Biochar as green adsorbents for pharmaceutical pollution in aquatic environments: A review. **Desalination**, v. 583, p. 117725, 19 ago. 2024.

HANDISO, B.; PÄÄKKÖNEN, T.; WILSON, B. P. Effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of pine wood biochar. **Waste Management Bulletin**, v. 2, n. 4, p. 281–287, 1 dez. 2024.

HUNT, J. et al. **Soil and Crop Management The Basics of Biochar : A Natural Soil Amendment**. [s.l: s.n.].

ISLAM, M. A. et al. Silver adsorption on biochar produced from spent coffee grounds: validation by kinetic and isothermal modelling. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 22, p. 28007–28021, 1 nov. 2022.

ISLAM, M. A. et al. Silver adsorption on biochar produced from spent coffee grounds: validation by kinetic and isothermal modelling. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 22, p. 28007–28021, 1 nov. 2024.

JAFRI, N. et al. A review on production and characterization of biochars for application in direct carbon fuel cells. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 118, p. 152–166, 1 ago. 2018.

JERZAK, W.; ACHA, E.; LI, B. Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis. **Energies 2024, Vol. 17, Page 5082**, v. 17, n. 20, p. 5082, 12 out. 2024.

KAMARUDIN, N. S. et al. **Biochar: A review of its history, characteristics, factors that influence its yield, methods of production, application in wastewater treatment and recent development**. **Biointerface Research in Applied Chemistry** AMG Transcend Association, , 15 dez. 2022.

KANG, Z. et al. A Review on Application of Biochar in the Removal of Pharmaceutical Pollutants through Adsorption and Persulfate-Based AOPs. **Sustainability 2022, Vol. 14, Page 10128**, v. 14, n. 16, p. 10128, 16 ago. 2022.

KARUNANITHI, R. et al. Sorption, kinetics and thermodynamics of phosphate sorption onto soybean stover derived biochar. **Environmental Technology & Innovation**, v. 8, p. 113–125, 1 nov. 2017.

KATYAL, S.; THAMBIMUTHU, K.; VALIX, M. Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on char yield and characteristics. **Renewable Energy**, v. 28, n. 5, p. 713–725, 1 abr. 2003.

KEPEKÇI, R. A.; YENER İLÇE, B.; DEMİR KANMAZALP, S. Plant-derived

biomaterials for wound healing. **Studies in Natural Products Chemistry**, v. 70, p. 227–264, 1 jan. 2021.

KHATER, E. S. et al. Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. **Scientific Reports 2024 14:1**, v. 14, n. 1, p. 1–8, 1 fev. 2024.

KUMAR, A. et al. Sustainable nano-hybrids of magnetic biochar supported g-C₃N₄/FeVO₄ for solar powered degradation of noxious pollutants- Synergism of adsorption, photocatalysis & photo-ozonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 431–451, 1 nov. 2017.

KUMAR, K. P.; REMYA, N. Technoeconomic analysis of biofuel production from agricultural residues through pyrolysis. **Green Approach to Alternative Fuel for a Sustainable Future**, p. 463–469, 1 jan. 2023.

LEE, K. T. et al. Spent coffee grounds biochar from torrefaction as a potential adsorbent for spilled diesel oil recovery and as an alternative fuel. **Energy**, v. 239, p. 122467, 15 jan. 2022.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: An introduction. **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**, n. January 2009, p. 1–14, 2024.

LENG, L.; HUANG, H. An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. **Bioresource Technology**, v. 270, p. 627–642, 1 dez. 2018.

LI, S.; CHEN, G. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures. **Waste Management**, v. 78, p. 198–207, 1 ago. 2018.

LI, W. et al. Effects of Temperature, Heating Rate, Residence Time, Reaction Atmosphere, and Pressure on Biochar Properties. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, v. 13, n. 1, p. 1–10, 20 nov. 2018.

LIU, Y. et al. Characterization of bio-char from pyrolysis of wheat straw and its evaluation on methylene blue adsorption. **Desalination and Water Treatment**, v. 46, n. 1–3, p. 115–123, 1 ago. 2012.

LÓPEZ, Y. C.; ORTEGA, G. A.; REGUERA, E. Applications of engineered magnetite nanoparticles for water pollutants removal. **Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science: Applications of Advanced Nanostructured Materials in Wastewater Remediation**, p. 23–68, 1 jan. 2023.

LUO, Q. et al. Effects of pyrolysis temperatures on the structural properties of straw biochar and its adsorption of tris-(1-chloro-2-propyl) phosphate. **Scientific Reports 2024 14:1**,

v. 14, n. 1, p. 1–14, 28 out. 2024.

MA, W. et al. Pyrolyzing spent coffee ground to biochar treated with H₃PO₄ for the efficient removal of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide: adsorptive behaviors and mechanism. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 109165, 1 fev. 2023.

MACIEL, F. S.; AREIAS, I. O. R.; HOLANDA, J. N. F. DE. Valorization potential of coffee grounds waste as a renewable pore-forming agent to produce low-cost porous ceramic support. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, p. e22612240023, 7 fev. 2023.

MAKWIKWI, T. et al. Carbon-Based Nanomaterials for Targeted Drug and Gene Delivery Systems. **Nanotechnology in the Life Sciences**, p. 455–488, 2022.

MINILLO, A. et al. Occurrence and ecological risk assessment of pharmaceutically active compounds in neotropical small basins, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 35, p. e8, 22 maio 2023.

MOZAFFARI, A.; ALIMOHAMMADI, F.; GASHTI, M. P. Functional Carbon-Based Materials for Blood Purification: Recent Advances Toward Improved Treatment of Renal Failure and Patient Quality of Life. **Bioengineering**, v. 12, n. 8, p. 893, 21 ago. 2025.

MUDALIGE, T. et al. Characterization of Nanomaterials: Tools and Challenges. **Nanomaterials for Food Applications**, p. 313–353, 1 jan. 2019.

MURTHY, P. S.; MADHAVA NAIDU, M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 66, p. 45–58, 1 set. 2012.

NGUYEN, V. T. et al. Alkaline modified biochar derived from spent coffee ground for removal of tetracycline from aqueous solutions. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, p. 101908, 1 abr. 2021.

OBRUCA, S. et al. Biotechnological conversion of spent coffee grounds into polyhydroxyalkanoates and carotenoids. **New Biotechnology**, v. 32, n. 6, p. 569–574, 25 dez. 2015.

PAHNILA, M. et al. A Review of Pyrolysis Technologies and the Effect of Process Parameters on Biocarbon Properties. **Energies 2023, Vol. 16, Page 6936**, v. 16, n. 19, p. 6936, 3 out. 2023.

PANG, Y. X. et al. An investigation on plant cell walls during biomass pyrolysis: A histochemical perspective on engineering applications. **Applied Energy**, v. 343, p. 121055, 1 ago. 2023.

PEIXOTO, B. S. et al. Highly Functionalized Microporous Activated Biochar from

Syagrus coronata Waste: Production, Characterization, and Application in Adsorption Studies. **Water** 2022, Vol. 14, Page 3525, v. 14, n. 21, p. 3525, 3 nov. 2022.

PICCA, G. et al. Suitability of Co-Composted Biochar with Spent Coffee Grounds Substrate for Tomato (*Solanum lycopersicum*) Fruiting Stage. **Horticulturae** 2023, Vol. 9, Page 89, v. 9, n. 1, p. 89, 10 jan. 2023.

PRATAP, T. et al. Nanobiochar: A sustainable solution for agricultural and environmental applications. **Nanomaterials for Soil Remediation**, p. 501–519, 1 jan. 2021.

PUSCEDDU, E. Comparison between ancient and fresh biochar samples, a study on the recalcitrance of carbonaceous structures during soil incubation **International Journal of New Technology and Research**. [s.l.: s.n.].

QIU, B. et al. Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 155, p. 105081, 1 maio 2021.

RAJPUT, V. et al. Biochar production methods and their transformative potential for environmental remediation. **Discover Applied Sciences**, v. 6, n. 8, p. 1–15, 1 ago. 2024.

RAMANAYAKA, S. et al. Nanobiochar: production, properties, and multifunctional applications. **Environmental Science: Nano**, v. 7, n. 11, p. 3279–3302, 16 nov. 2020.

RAMBHATLA, N. et al. Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. **Results in Engineering**, v. 25, p. 103679, 1 mar. 2025.

RAMEZANZADEH, H. et al. The Impacts of Biochar-Assisted Factors on the Hydrophysical Characteristics of Amended Soils: A Review. **Sustainability** 2023, Vol. 15, Page 8700, v. 15, n. 11, p. 8700, 27 maio 2023.

RAY, S. S.; GUSAIN, R.; KUMAR, N. Adsorption in the context of water purification. In: **Carbon Nanomaterial-Based Adsorbents for Water Purification**. [s.l.] Elsevier, 2020a. p. 67–100.

RAY, S. S.; GUSAIN, R.; KUMAR, N. Adsorption equilibrium isotherms, kinetics and thermodynamics. **Carbon Nanomaterial-Based Adsorbents for Water Purification**, p. 101–118, 1 jan. 2020b.

ROSHAN, A.; GHOSH, D.; MAITI, S. K. How temperature affects biochar properties for application in coal mine spoils? A meta-analysis. **Carbon Research**, v. 2, n. 1, p. 1–17, 1 dez. 2023.

SARKAR, D. et al. A comprehensive review of production and characterization of biochar for removal of organic pollutants from water and wastewater. **Water-Energy Nexus**, v. 7, p. 243–265, 1 dez. 2024.

SERTOLI, L. et al. **COFFEE WASTE BIOCHARS: CHARACTERIZATION AND ZINC ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTION** *Coffee Science*. [s.l: s.n.].

SHARMA, A. et al. Carbon materials as CO₂ adsorbents: a review. **Environmental Chemistry Letters** **2021** **19:2**, v. 19, n. 2, p. 875–910, 4 jan. 2021.

SLEZAK, R. et al. An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Reactors Torrefaction vs. Biomass Pyrolyzers—Part 2. **Energies** **2023**, **Vol. 16**, **Page 2212**, v. 16, n. 5, p. 2212, 24 fev. 2023.

SONG, B. et al. Physicochemical property and colloidal stability of micron- and nano-particle biochar derived from a variety of feedstock sources. **Science of The Total Environment**, v. 661, p. 685–695, 15 abr. 2019.

SURESH BABU, K. K. B. et al. Production of biochar from waste biomass using slow pyrolysis: Studies of the effect of pyrolysis temperature and holding time on biochar yield and properties. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 7, p. 318–334, 1 jan. 2024.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 19, n. 1, p. 191–215, 1 mar. 2020.

TORCHIA, D. F. DE O. et al. Production and characterization of biochar obtained from different biomass and pyrolysis temperature. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 39, n. 2, p. 415–427, 1 jun. 2022.

TREMBLAY, L.; STEWART, M.; NORTHCOTT, G. Emerging Contaminants. **Revolve**, v. August, p. 215–222, 1 jan. 2011.

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, 1 mar. 2016.

UDDIN, M. N. et al. Waste coffee oil: A promising source for biodiesel production. **Energy Procedia**, v. 160, p. 677–682, 1 fev. 2019.

VARDON, D. R. et al. Complete utilization of spent coffee grounds to produce biodiesel, bio-oil, and biochar. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 1, n. 10, p. 1286–1294, 7 out. 2013.

VARKOLU, M. et al. Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications. **Catalysts** **2025**, **Vol. 15**, **Page 243**, v. 15, n. 3, p. 243, 4 mar. 2025.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002–1022, 1 ago. 2019.

WANG, W. et al. Adsorption of uremic toxins using biochar for dialysate regeneration.

Biomass Conversion and Biorefinery, v. 13, n. 13, p. 1, 1 ago. 2021.

WEI, L.; LU, J. Adsorption of microcystin-LR by rice straw biochars with different pyrolysis temperatures. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101609, 1 ago. 2021.

WEI, Z. et al. Preparation of Biochar with Developed Mesoporous Structure from Poplar Leaf Activated by KHCO_3 and Its Efficient Adsorption of Oxytetracycline Hydrochloride. **Molecules**, v. 28, n. 7, p. 3188, 1 abr. 2023.

WYSTALSKA, K.; GROSSER, A. Sewage Sludge-Derived Biochar and Its Potential for Removal of Ammonium Nitrogen and Phosphorus from Filtrate Generated during Dewatering of Digested Sludge. **Energies 2024, Vol. 17, Page 1310**, v. 17, n. 6, p. 1310, 8 mar. 2024.

XU, X. et al. Indispensable role of biochar-inherent mineral constituents in its environmental applications: A review. **Bioresource Technology**, v. 241, p. 887–899, 1 out. 2017.

YAN, L. et al. ZnCl_2 modified biochar derived from aerobic granular sludge for developed microporosity and enhanced adsorption to tetracycline. **Bioresource Technology**, v. 297, p. 122381, 1 fev. 2020.

YANG, J. et al. Exploring the Properties and Potential Uses of Biocarbon from Spent Coffee Grounds: A Comparative Look at Dry and Wet Processing Methods. **Processes**, v. 11, n. 7, p. 2099, 1 jul. 2023.

ZHANG, X. et al. Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar. **Bioresource Technology**, v. 296, p. 122318, 1 jan. 2020.

ZHAO, N. et al. Spent coffee grounds: Present and future of environmentally friendly applications on industries-A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 143, p. 104312, 1 jan. 2024a.

ZHAO, S. Thermochemical processes for biohydrogen production. **Waste to Renewable Biohydrogen: Volume 1: Advances in Theory and Experiments**, p. 139–177, 1 jan. 2021.

ZHAO, S. et al. Reducing carbon footprint of typical coffee consumption from the whole lifecycle viewpoint. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 106, p. 107476, 1 maio 2024b.

ZHAO, S. X.; TA, N.; WANG, X. D. Effect of Temperature on the Structural and Physicochemical Properties of Biochar with Apple Tree Branches as Feedstock Material. **Energies 2017, Vol. 10, Page 1293**, v. 10, n. 9, p. 1293, 30 ago. 2017.

ZHUO, Q. et al. Applications of biochar in medical and related environmental fields:

current status and future perspectives. **Carbon Research**, v. 2, n. 1, p. 1–23, 1 dez. 2023.

ZORNOZA, R. et al. Stability, nutrient availability and hydrophobicity of biochars derived from manure, crop residues, and municipal solid waste for their use as soil amendments. **Chemosphere**, v. 144, p. 122–130, 1 fev. 2016.

ZUNGU, V. et al. Fabrication of Biochar Materials from Biowaste Coffee Grounds and Assessment of Its Adsorbent Efficiency for Remediation of Water-Soluble Pharmaceuticals. **Sustainability 2022, Vol. 14, Page 2931**, v. 14, n. 5, p. 2931, 2 mar. 2022.