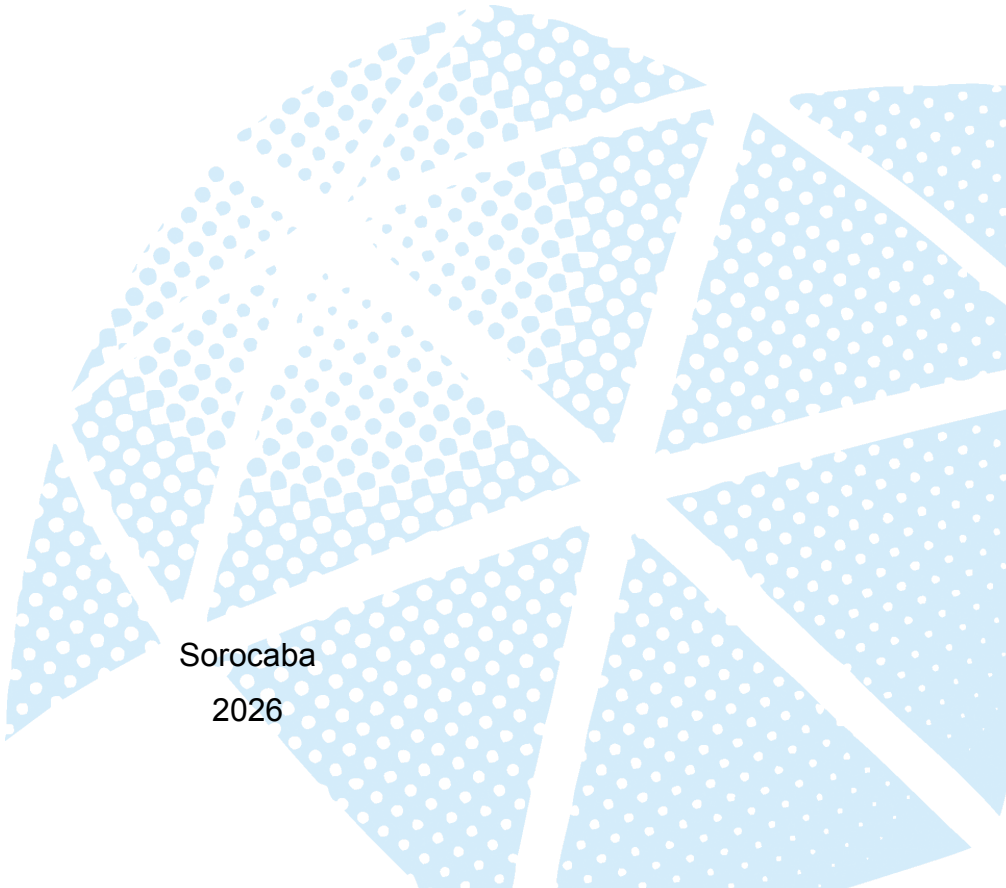


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

JÚLIA ESPÍNDOLA ALVES

**DESCONTAMINAÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS EM MEIO AQUOSO
UTILIZANDO BIOCHAR PROVENIENTE DE RESÍDUO AGRÍCOLA**

Sorocaba
2026



JÚLIA ESPÍNDOLA ALVES

**DESCONTAMINAÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS EM MEIO AQUOSO
UTILIZANDO BIOCHAR PROVENIENTE DE RESÍDUO AGRÍCOLA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do
título de Bacharela em Engenharia
Ambiental.

Orientador(a): Profa. Dra. Cláudia Hitomi
Watanabe Rezende

Coorientador(a): Profa. Dra. Maria Lúcia
Pereira Antunes.

Sorocaba

2026

A474d

Alves, Júlia Espíndola

Descontaminação de corantes têxteis em meio aquoso utilizando biochar
proveniente de resíduo agrícola / Júlia Espíndola Alves. -- Sorocaba, 2026

75 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia,
Sorocaba

Orientadora: Cláudia Hitomi Watanabe

Coorientadora: Maria Lúcia Pereira Antunes

1. Resíduo agrícola. 2. Biochar. 3. Adsorção. 4. Química ambiental. I. Título.

JÚLIA ESPÍNDOLA ALVES

**DESCONTAMINAÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS EM MEIO AQUOSO
UTILIZANDO BIOCHAR PROVENIENTE DE RESÍDUO AGRÍCOLA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Ambiental.

Data da defesa: 12/02/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **CLAUDIA HITOMI WATANABE REZENDE**
Data: 12/02/2026 10:36:09-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Cláudia Hitomi Watanabe Rezende
UNESP - Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

Documento assinado digitalmente
 **ARLETT PAMELA ARO MENDOZA**
Data: 12/02/2026 13:56:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Arlett Pamela Aro Mendonza
UNESP - Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE LOPES**
Data: 12/02/2026 10:49:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Alexandre Lopes
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, por todo o amor, apoio e incentivo incondicional ao longo dessa trajetória. Vocês foram minha base, meu porto seguro e minha maior motivação para continuar, mesmo diante dos momentos mais desafiadores, me tornando a continuação de um sonho.

À minha professora coorientadora, Maria Lúcia, expresso minha profunda gratidão pela oportunidade concedida, pela confiança depositada em mim e pelas trocas tão enriquecedoras ao longo desse percurso. Sua orientação foi essencial para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Um agradecimento mais do que especial à minha orientadora Cláudia Watanabe, que esteve ao meu lado em cada etapa, sempre de forma generosa, paciente e incansável. Levo comigo não apenas todo o aprendizado construído juntas, mas também um imenso carinho e uma inspiração que levarei para a vida inteira.

Ao meu laboratório, que foi muito mais do que um espaço de pesquisa: foi um ambiente de aprendizado constante, parceria e crescimento. Sou imensamente grata a todas as meninas, por tornarem esse lugar tão acolhedor, leve e inspirador, sempre dispostas a ensinar, compartilhar conhecimento e apoiar umas às outras.

Aos meus amigos da graduação, obrigada por cada palavra de incentivo, por tornarem meus dias mais leves, por ouvirem meus desabafos e por estarem presentes em todos os momentos. Vocês deram ainda mais significado a essa caminhada.

Este trabalho carrega um pedacinho de cada pessoa que fez parte dessa trajetória ao longo da minha graduação.

RESUMO

A crescente produção de resíduos e efluentes industriais tem contribuído para a intensificação do descarte inadequado de efluentes contendo corantes, especialmente provenientes do setor têxtil. Esse cenário acarreta impactos ambientais significativos, devido à alta toxicidade, estabilidade química e persistência dessas substâncias nos corpos hídricos, comprometendo a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos. Como alternativa sustentável para o tratamento desses efluentes, destaca-se a adsorção utilizando biochar, um material de baixo custo produzido a partir da pirólise de resíduos agrícolas. Neste contexto, o estudo teve como objetivo principal desenvolver e avaliar biochars produzidos a partir do bagaço de cana-de-açúcar como materiais adsorventes, em temperaturas de 400 °C e 700 °C, para a remoção de diferentes corantes têxteis em meio aquoso. Buscou-se comparar o desempenho do biochar convencional com biochars modificados magneticamente, analisando a influência de variáveis como pH, tempo de contato e temperatura de pirólise na eficiência do processo de adsorção. Parte do material foi modificada com agentes magnetizantes, como lama vermelha e cloreto de ferro (FeCl_3), visando aprimorar suas propriedades adsorventes. Foram preparados sete tipos de soluções de corantes e determinadas curvas de calibração por espectrofotometria UV-Vis. Ensaios de adsorção foram conduzidos em diferentes condições de pH (ácido, neutro e básico), além da determinação do ponto de carga zero (pHpzc) dos materiais. Também foram realizados testes cinéticos ao longo de 24 horas para avaliar o comportamento temporal da remoção dos contaminantes. As curvas de calibração apresentaram elevada linearidade (R^2 próximo de 1), garantindo confiabilidade na quantificação dos corantes. Os ensaios indicaram que o pH exerce influência significativa na eficiência de adsorção, com melhores desempenhos observados em condições ácidas. Entre os materiais avaliados, o biochar modificado com FeCl_3 destacou-se, apresentando maior capacidade de remoção e estabilidade superficial. Os biochars pirolisados a 700 °C mostraram maior área superficial e melhor desempenho quando comparados aos produzidos a 400 °C. A análise cinética revelou rápida adsorção inicial, com tendência à estabilização ao longo do tempo. O biochar proveniente do bagaço de cana-de-açúcar demonstrou elevado potencial como adsorvente alternativo para tratamento de efluentes têxteis, constituindo uma solução sustentável e de baixo custo. A modificação magnética, especialmente com FeCl_3 , aprimorou significativamente a eficiência de remoção dos corantes. Os resultados confirmam a viabilidade técnica do material como substituto parcial do carvão ativado comercial, contribuindo para a valorização de resíduos agrícolas e para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente responsáveis no tratamento de águas residuais, promovendo uma gestão mais responsável de resíduos e a sustentabilidade no tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Resíduo agrícola, Biochar, Adsorção, Química ambiental.

ABSTRACT

The increasing production of industrial waste and effluents has contributed to the intensification of the improper disposal of effluents containing dyes, especially from the textile sector. This scenario leads to significant environmental impacts due to the high toxicity, chemical stability, and persistence of these substances in water bodies, compromising water quality and aquatic ecosystems. As a sustainable alternative for the treatment of these effluents, adsorption using biochar stands out, a low-cost material produced from the pyrolysis of agricultural waste. In this context, the main objective of this study was to develop and evaluate biochars produced from sugarcane bagasse as adsorbent materials, at temperatures of 400 °C and 700 °C, for the removal of different textile dyes in aqueous media. The study sought to compare the performance of conventional biochar with magnetically modified biochars, analyzing the influence of variables such as pH, contact time, and pyrolysis temperature on the efficiency of the adsorption process. Part of the material was modified with magnetizing agents, such as red mud and iron chloride (FeCl_3), aiming to improve its adsorbent properties. Seven types of dye solutions were prepared, and calibration curves were determined by UV-Vis spectrophotometry. Adsorption tests were conducted under different pH conditions (acidic, neutral, and basic), in addition to determining the point of zero charge (pH_{pzc}) of the materials. Kinetic tests were also performed over 24 hours to evaluate the temporal behavior of contaminant removal. The calibration curves showed high linearity (R^2 close to 1), ensuring reliability in the quantification of the dyes. The tests indicated that pH exerts a significant influence on adsorption efficiency, with better performance observed under acidic conditions. Among the materials evaluated, the biochar modified with FeCl_3 stood out, showing greater removal capacity and surface stability. Biochars pyrolyzed at 700 °C showed a larger surface area and better performance when compared to those produced at 400 °C. Kinetic analysis revealed rapid initial adsorption, with a tendency towards stabilization over time. Biochar derived from sugarcane bagasse demonstrated high potential as an alternative adsorbent for the treatment of textile effluents, constituting a sustainable and low-cost solution. Magnetic modification, especially with FeCl_3 , significantly improved the efficiency of dye removal. The results confirm the technical viability of the material as a partial substitute for commercial activated carbon, contributing to the valorization of agricultural waste and the development of environmentally responsible technologies in wastewater treatment, promoting more responsible waste management and sustainability in effluent treatment.

Keywords: Agricultural waste, Biochar, Adsorption, Environmental chemistry.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivo	10
1.2 Objetivos específicos	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Impactos ambientais da indústria têxtil	11
2.2 Geração e impactos dos resíduos da indústria têxtil no Brasil	11
2.3 Avaliação do risco ecogenotóxico de corantes têxteis	12
2.4 Impacto toxicológico na fauna	14
2.6 Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos	16
2.7 Biochar de bagaço digerido anaerobicamente	17
2.8 Materiais alternativos para remoção de azul de metileno	18
2.9 Espectrofotometria de derivadas aplicada a corantes	19
2.11 Avanços em modelos de adsorção de corantes	20
2.12 Biomassa de casca de limão como adsorvente	21
2.13 Remoção de Direct Green 26 por serragem	22
3 ANÁLISE COMPARATIVA	27
3.1 Contextualização corante da indústria têxtil	27
3.2 Comprovação do problema do projeto e como ele afeta a biota	27
3.6 Modificação do biochar	30
4 MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 Obtenção do material adsorvente	32
4.2 Produção do biochar	32
4.3 Produção biochar modificado com adição de ferro	32
4.4 Preparação das Soluções de Corantes	33
4.5 Procedimento para ensaio da adsorção	34
4.6 Preparo das soluções com regulação de pH	34
4.7 Caracterização dos materiais produzidos e Determinação do ponto de carga zero (pH _{pcz})	34
4.8 Cinética de adsorção no intervalo de 24h	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 Caracterização teórica do biochar com base na Literatura	36
5.2 Curvas de calibração obtidas a partir das soluções dos corantes	36
5.3 Experimento da eficiência dos filtros	44
5.4 Avaliação do desempenho dos biochars modificado com ferro	46
5.5 Resultados Experimentais de PH de carga zero	48
5.6 Resultados da adsorção dos corantes em meio pH 3	54
5.6.1 Determinação da concentração dos corantes	55
5.6.2 Cálculo da eficiência de remoção	56
5.7 Resultados da adsorção dos corantes em meio pH 10	59

5.8 Resultados Experimentais de adsorção para o corante C1 - pH 10 por 24h	62
6 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

As diferentes atividades econômicas e o crescimento populacional têm levado a um aumento exponencial dos resíduos gerados nas últimas décadas, em decorrência das atividades agrícolas, urbanas e industriais. Esse movimento é perceptível devido aos dados que indicam que a “geração de resíduos sólidos urbanos pode crescer de 2,3 bilhões de toneladas em 2023 para cerca de 3,8 bilhões de toneladas até 2050”, segundo o Relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) divulgado em fevereiro do ano de 2024 (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE, 2024).

O Brasil segue essa tendência, com uma projeção de crescimento de mais de 50% na geração de resíduos até 2050, podendo alcançar 120 milhões de toneladas anuais, segundo o relatório da Agência Brasil (2024).

Assim, é possível perceber que muitos resíduos acabam sendo destinados incorretamente no meio ambiente, agravando a poluição do solo e da água, além de representar um risco significativo à saúde pública, este ponto se reflete nos dados sobre a destinação inadequada de resíduos sólidos no Brasil, no qual nos últimos anos revelam um cenário alarmante, onde em 2022, o país gerou 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, dos quais mais de 33 milhões de toneladas, aproximadamente 40% do total, foram descartadas de maneira inadequada, em locais como lixões a céu aberto, terrenos baldios e córregos de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (2024).

Segundo Almeida, Dilarri e Corso (2016), a contaminação ambiental causada por efluentes industriais é um dos desafios mais urgentes da atualidade, particularmente no setor têxtil, que é conhecido pelo seu alto consumo de água e uso intensivo de corantes químicos. (SILVA et al., 2016).

A poluição das águas por corantes industriais não apenas altera a estética dos corpos hídricos, mas também impede a penetração da luz solar, afetando a fotossíntese aquática e ameaçando a biodiversidade dos ecossistemas (SILVA et al., 2016). Em resposta a esses impactos negativos, novas soluções sustentáveis têm ganhado destaque, uma vez que os métodos tradicionais disponíveis no mercado nem sempre são eficazes ou podem gerar subprodutos prejudiciais ao meio ambiente (PNUMA, 2024).

Deste modo, cresce o interesse e a necessidade de se buscar alternativas para a reutilização ou transformação desses resíduos em produtos de maior valor agregado, sendo necessário o desenvolvimento de pesquisas com abordagem multidisciplinar.

A adoção de adsorventes naturais e de baixo custo, como o bagaço de cana-de-açúcar utilizado no trabalho, não só oferece uma solução econômica e eficiente para a remoção de corantes, mas também promove a gestão sustentável de resíduos (SANTOS, 2020).

Portanto, a partir da biomassa, pode ser produzido o biochar, um material carbonizado que intensifica o efeito de adsorção de contaminantes em soluções aquosas. O biochar é um produto obtido através da pirólise de biomassa vegetal em ambiente com baixa atmosfera de oxigênio a temperaturas que variam geralmente entre 300°C e 700°C (UTAH STATE UNIVERSITY, 2024).

Este processo transforma materiais que eram resíduos agrícolas em um produto poroso, rico em carbono e com alta área de superfície específica, o que contribui para o condicionamento do solo, aumentando o rendimento das culturas e ampliando sua eficiência como adsorvente na captura de poluentes, incluindo corantes (ZAHRA et al., 2022).

1.1 Objetivo

Diante do exposto, o presente projeto propõe obter e avaliar o biochar produzido a partir da biomassa de cana-de-açúcar, nas temperaturas de 400°C e 700°C, na remoção de corantes têxteis industriais em meio aquoso.

1.2 Objetivos específicos

- Produzir biochar a partir de biomassa residual a partir do processo de pirólise.
- Modificar o biochar com agentes utilizando solução contendo ferro e resíduo de mineração (lama vermelha).
- Caracterizar os materiais produzidos.
- Avaliar a eficiência de remoção de corantes têxteis em diferentes pHs.
- Comparar a remoção de corantes com os materiais produzidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Previamente ao início do desenvolvimento dos experimentos abordados no Trabalho de Conclusão de Curso, conduziu-se uma revisão bibliográfica com a finalidade de identificar, analisar e compreender os principais conceitos, pesquisas e abordagens relacionados ao tema proposto. Para a realização dessa etapa, foram consultadas bases de dados científicas como ScienceDirect, Web of Science e SciELO, com ênfase em artigos, dissertações e teses. A revisão teve papel fundamental na consolidação da fundamentação teórica, na definição do problema de pesquisa e no direcionamento da metodologia experimental adotada.

2.1 Impactos ambientais da indústria têxtil

A indústria têxtil está entre as mais poluentes do mundo em razão do uso intensivo de água e produtos químicos ao longo de suas etapas produtivas, especialmente nos processos de tingimento e acabamento. Estes procedimentos resultam na geração de efluentes contendo corantes, metais pesados e outros compostos potencialmente tóxicos, capazes de provocar impactos significativos aos corpos hídricos (ALMEIDA et al., 2016).

No contexto brasileiro, o setor apresenta elevada relevância socioeconômica, configurando-se como o segundo maior empregador da indústria de transformação, com aproximadamente 1,6 milhão de empregos diretos (ALMEIDA et al., 2016).

Além dos impactos ambientais, destaca-se a ampla utilização de corantes sintéticos ao longo das últimas décadas, cujas propriedades químicas permitem diferentes formas de manipulação e tratamento. Nesse sentido, são propostas e classificadas distintas tecnologias para o tratamento de efluentes têxteis em meio aquoso, incluindo processos físico-químicos e biológicos, técnicas adsorptivas, biodegradação, tratamentos oxidativos avançados e sistemas consorciados, promovendo uma maior conscientização sobre a necessidade de práticas mais sustentáveis e ecoeficientes nesse setor.

2.2 Geração e impactos dos resíduos da indústria têxtil no Brasil

A indústria têxtil brasileira destaca-se como uma das maiores do mundo, apresentando elevada relevância econômica e social. No entanto, essa expressiva

produção está associada à geração significativa de resíduos ao longo de todas as etapas da cadeia produtiva, desde a fabricação até o descarte final. De acordo com Santos 2019, os resíduos têxteis ocasionam impactos ambientais adversos, especialmente devido ao volume gerado, à presença de substâncias químicas e às dificuldades relacionadas ao manejo e à disposição adequada. Através de uma revisão sistemática da literatura, os autores reúnem e analisam estudos que abordam a geração, gestão e destino dos resíduos têxteis, destacando a necessidade urgente de práticas mais sustentáveis no setor e propondo soluções viáveis para mitigação.

Portanto, no Brasil a maioria dos resíduos têxteis acaba em aterros ou é incinerada, processos que possuem efeitos negativos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde pública. Sendo assim, os autores destacam que a falta de regulamentação específica e a gestão ineficiente dos resíduos são fatores críticos que agravam a situação.

Para enfrentar esses desafios, o artigo sugere várias alternativas, entre as soluções propostas, destacam-se: o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem, que permitam a reciclagem eficiente de fibras têxteis, transformando resíduos em novos produtos de valor agregado; a implementação de modelos de economia circular no setor têxtil, promovendo a reutilização e o reaproveitamento de materiais ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos; o estabelecimento de regulamentações específicas para a gestão de resíduos têxteis, incentivando práticas sustentáveis e responsabilizando os fabricantes pelo ciclo completo de seus produtos; e o aumento da conscientização pública e a educação de consumidores e empresas sobre a importância da sustentabilidade e das práticas de descarte responsável.

Por fim, conclui-se que a colaboração entre governo, indústria e sociedade é fundamental para alcançar esses objetivos e garantir um futuro mais sustentável para o Brasil.

2.3 Avaliação do risco ecogenotoxicológico de corantes têxteis

A utilização de corantes têxteis em efluentes industriais representa um potencial risco ecogenotoxicológico para organismos aquáticos e para o equilíbrio ambiental, especialmente no que se refere aos compostos Acid Black 210 e Disperse Violet 93, amplamente empregados no setor têxtil (ROCHA, 2016).

Os compostos são encontrados frequentemente em efluentes industriais e ou coureiras nacionais e internacionais, lançados sem tratamento adequado, causando poluição significativa em corpos d'água e solos adjacentes, além de impacto na saúde dos seres humanos. A pesquisa diz respeito à avaliação ecotoxicológica (efeitos adversos no ambiente), verifica a intensidade dos corantes em organismos aquáticos, como peixes, algas e microcrustáceos. Já para a avaliação genotoxicológica (danos ao material genético), foram testados também em diversos organismos aquáticos expostos a essa condição.

As metodologias utilizam diversos bioensaios, como a avaliação da permeabilidade através do Ensaio de Permeabilidade em Membrana Artificial Paralela (PAMPA), mutagênico do através do Teste de Ames com as linhagens de *Salmonella typhimurium* TA98 e TA100 na ausência e na presença de metabolização exógena (mistura S9), potencial genotóxico através do Ensaio do Cometa, a ensaio do embriotóxico através do Ensaio de Toxicidade Aguda com Embriões de Zebrafish (Daniorerio), e, por fim, juntando os dados disponíveis na literatura científica, a avaliação do risco ecogenotoxicológico da utilização deste corante têxtil, demonstra o nível de distúrbio no meio ambiente.

Os resultados revelam que muitos corantes têxteis causam danos ao DNA, evidenciados por quebras de fitas de DNA e formação de micronúcleos, indicando seu potencial mutagênico e carcinogênico. Ademais, possuem alta toxicidade aguda e crônica, afetando a sobrevivência, crescimento e reprodução desses organismos. Em conclusão, evidencia que os corantes utilizados na indústria têxtil representam uma ameaça significativa ao meio ambiente e à saúde pública devido ao seu potencial tóxico e genotóxico. Destacando a urgência de implementar medidas de controle e tratamento de efluentes industriais para minimizar os impactos negativos e promover a sustentabilidade na produção têxtil.

No estudo Avaliação do risco ecogenotoxicológico da utilização de corantes têxteis, Rocha (2016) investigou os impactos ambientais e os efeitos ecogenotoxicológicos de corantes como Acid Black 210 e Disperse Violet 93 em organismos aquáticos, destacando a significância desses compostos em efluentes industriais e seus potenciais efeitos adversos no ambiente.

Os compostos são encontrados frequentemente em efluentes industriais e ou coureiras nacionais e internacionais, lançados sem tratamento adequado, causando

poluição significativa em corpos d'água e solos adjacentes, além de impacto na saúde dos seres humanos. A pesquisa diz respeito à avaliação ecotoxicológica (efeitos adversos no ambiente), verifica a intensidade dos corantes em organismos aquáticos, como peixes, algas e microcrustáceos. Já para a avaliação genotoxicológica (danos ao material genético), foram testados também em diversos organismos aquáticos expostos a essa condição.

As metodologias utilizam diversos bioensaios, como a avaliação da permeabilidade através do Ensaio de Permeabilidade em Membrana Artificial Paralela (PAMPA), mutagênico do através do Teste de Ames com as linhagens de *Salmonella typhimurium* TA98 e TA100 na ausência e na presença de metabolização exógena (mistura S9), potencial genotóxico através do Ensaio do Cometa, a ensaio do embriotóxico através do Ensaio de Toxicidade Aguda com Embriões de Zebrafish (*Daniorerio*), e, por fim, juntando os dados disponíveis na literatura científica, a avaliação do risco ecogenotoxicológico da utilização deste corante têxtil, demonstra o nível de distúrbio no meio ambiente.

Os resultados revelam que muitos corantes têxteis causam danos ao DNA, evidenciados por quebras de fitas de DNA e formação de micronúcleos, indicando seu potencial mutagênico e carcinogênico. Ademais, possuem alta toxicidade aguda e crônica, afetando a sobrevivência, crescimento e reprodução desses organismos. Em conclusão, evidencia que os corantes utilizados na indústria têxtil representam uma ameaça significativa ao meio ambiente e à saúde pública devido ao seu potencial tóxico e genotóxico. Destacando a urgência de implementar medidas de controle e tratamento de efluentes industriais para minimizar os impactos negativos e promover a sustentabilidade na produção têxtil.

2.4 Impacto toxicológico na fauna

Os impactos toxicológicos e comportamentais de corantes naturais e sintéticos em organismos aquáticos, especialmente em fases iniciais de desenvolvimento, podem ser avaliados por meio de modelos biológicos em zebrafish (*Danio rerio*). Estudos indicam que esses organismos constituem uma ferramenta eficaz para analisar a segurança ambiental de diferentes tipos de corantes amplamente utilizados na indústria, permitindo a mensuração de toxicidade aguda e alterações comportamentais decorrentes da exposição a essas substâncias (ABE et al., 2017).

Os zebrafish são escolhidos por suas características convenientes, como ciclo de vida curto, alta fecundidade e transparência dos embriões, que permitem observações detalhadas de alterações morfológicas e comportamentais. Os resultados mostram que os corantes sintéticos, em geral, apresentam maior toxicidade em comparação com os corantes naturais. Especificamente, os zebrafish expostos a corantes sintéticos exibem uma maior taxa de mortalidade, malformações no desenvolvimento embrionário e alterações comportamentais significativas, como natação irregular e menor capacidade de resposta a estímulos.

Em contrapartida, os corantes naturais tendem a apresentar menores efeitos adversos, sugerindo uma maior biocompatibilidade e segurança ambiental.

Outra forma de estudo foi considerada, onde a combinação de testes toxicológicos e comportamentais como uma abordagem integrada para a avaliação de risco ambiental, permitindo uma compreensão mais abrangente dos potenciais impactos dos corantes em organismos aquáticos, indo além das análises químicas tradicionais.

Por fim, a pesquisa destaca a necessidade de uma regulamentação mais rigorosa para o uso de corantes sintéticos, incentivando o desenvolvimento e a utilização de alternativas naturais menos prejudiciais. Além disso, sugere que os zebrafish podem servir como um modelo eficiente e de baixo custo para estudos ecotoxicológicos, contribuindo para a identificação de substâncias potencialmente perigosas antes de seu amplo uso industrial.

2.5 Adsorção de azul de metileno por biomassa residual

A biomassa de pele prata de café (*coffee silverskin*) tem sido investigada como um bioadsorvente de baixo custo para a remoção do corante azul de metileno em soluções aquosas, destacando seu desempenho em estudos de cinética e equilíbrio de adsorção quando comparada a outros materiais alternativos de baixo custo (CALCIOLARI et al., 2022).

Os resíduos que normalmente seriam descartados podem ser aproveitados como biomassa ou transformados em biochar para auxiliar na remediação de águas contaminadas por corantes industriais. Resíduos agrícolas como cascas de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, palha e cascas de frutas, bem como resíduos de processamento de madeira e até mesmo borra de café, são exemplos de materiais que podem ser utilizados para essa finalidade.

Neste editorial é descrito como foi o desenvolvimento da biomassa feita da pele prata de café, um subproduto gerado durante o processamento do café, sendo abundantemente disponível e de baixo custo. Neste estudo, os pesquisadores investigaram o potencial dessa biomassa como alternativa sustentável para a remoção de corantes tóxicos de efluentes industriais.

Dessa forma, na avaliação da capacidade de adsorção da pele prata de café, foram realizados experimentos em que soluções aquosas contendo corante azul de metileno foram tratadas com diferentes quantidades de biomassa, sendo elas MB de 200 mg/L; concentração inicial de MB variando entre 10 e 900 mg/L. Os parâmetros como tempo de contato, pH da solução e concentração inicial do corante foram variados para otimizar as condições de adsorção.

Contudo, os resultados demonstraram que a pele prata de café apresenta uma capacidade significativa de adsorção do corante azul de metileno, onde a adsorção foi influenciada pelo pH da solução, sendo mais eficaz em condições ligeiramente ácidas. Além disso, observou-se que a capacidade de adsorção aumentou com o aumento da quantidade de biomassa utilizada, sendo assim a utilização da pele prata de café como bioadsorvente de baixo custo oferece uma solução promissora para o tratamento de efluentes industriais. Contribuindo para a redução do impacto ambiental causado pela descarga de corantes em corpos d'água, essa abordagem também valoriza um resíduo agroindustrial, promovendo a sustentabilidade e o aproveitamento de recursos renováveis.

2.6 Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos

Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos têm sido amplamente investigados como alternativa sustentável para a remoção de corantes sintéticos em efluentes aquosos. Revisões recentes indicam que tanto o carvão ativado quanto bioadsorventes derivados de resíduos orgânicos apresentam eficiência mínima de aproximadamente 70 % na remoção desses contaminantes, evidenciando o potencial desses materiais como matérias-primas promissoras para a produção de adsorventes de baixo custo destinados ao tratamento de efluentes (PIQUET; MARTELLI, 2022).

Nesta revisão, os autores compilaram pesquisas que foram realizadas em periódicos de base nacional e internacional, dos últimos seis anos, sobre carvão

ativado e bioissorvente, com eficiência de, no mínimo 70% na remoção de corantes sintéticos.

Sendo assim, foram explorados diferentes tipos de resíduos orgânicos, incluindo resíduos agrícolas, alimentares e industriais, como fontes de bioadsorventes para a remoção de corantes, trazendo toda a caracterização da molécula e comportamento do tal. Diversos materiais provenientes de resíduos orgânicos foram investigados, como cascas de frutas, cascas de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, borra de café, entre outros. Esses materiais são tratados de forma apropriada para aumentar sua capacidade de adsorção, por exemplo, através de modificação química ou ativação superficial.

Ademais, destaca os principais parâmetros expostos na literatura, que influenciam a eficácia dos bioadsorventes na remoção de corantes, como tempo de contato, pH da solução, concentração inicial de corante e temperatura. Além disso, são discutidos diferentes mecanismos de adsorção envolvidos nesse processo, incluindo adsorção física e química, interações de superfície e complexação.

Os resultados compilados indicam que os bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos apresentam uma capacidade única para cada tipo de material para remoção de corantes de soluções aquosas, podendo entender como a vigência do material é atribuída à presença de grupos funcionais em sua estrutura que interagem com os corantes por meio de forças de adsorção.

A importância desse estudo está na relevância do estudo literário e conhecimento específico de cada material que será trabalhado no ensaio de experimento.

2.7 Biochar de bagaço digerido anaerobicamente

A obtenção de biochar a partir do bagaço de cana-de-açúcar previamente submetido à digestão anaeróbica representa uma estratégia de aproveitamento de resíduos agroindustriais. Durante a digestão anaeróbica, a biomassa é transformada em biogás, resultando na formação de um subproduto sólido denominado digestato. Esse material pode ser posteriormente convertido em biochar, cujas propriedades físico-químicas indicam potencial utilização tanto como material adsorvente quanto como agente de melhoria ambiental, evidenciando sua aplicabilidade em processos de remediação (INYANG et al., 2010).

O digestato proveniente do bagaço de cana-de-açúcar foi empregado como precursor para a produção de biochar por meio do processo de pirólise, que consiste na decomposição térmica de materiais orgânicos sob elevadas temperaturas e em

atmosfera controlada. No estudo, o material foi submetido à pirólise a 600 °C, em ambiente inerte de nitrogênio, resultando na formação de biocarvão.

O objetivo da pesquisa foi avaliar as propriedades do biochar obtido e investigar seu potencial de aplicação em diferentes áreas, como agricultura, remediação ambiental e sequestro de carbono. Para isso, o material foi caracterizado quanto às suas propriedades físico-químicas, incluindo composição elementar, estrutura porosa, área superficial específica e capacidade de adsorção.

Os resultados demonstraram que o biochar derivado do digestato apresentou características favoráveis ao uso agrícola, como elevada porosidade e área superficial expressiva. Ademais, evidenciou potencial para aplicações em processos de remediação ambiental, em função de sua capacidade de adsorver poluentes orgânicos e inorgânicos presentes no solo e na água.

Além dos benefícios ambientais diretos, a utilização de biochar obtido a partir de resíduos orgânicos, como o bagaço de cana-de-açúcar, contribui para a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que o carbono estabilizado em sua estrutura pode permanecer armazenado no solo por longos períodos.

2.8 Materiais alternativos para remoção de azul de metileno

Os efluentes oriundos da indústria têxtil apontam grande toxicidade e resistência à degradação quando submetidos ao tratamento. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos agroindustriais surge como uma alternativa sustentável e economicamente viável para a remediação de águas residuais contaminadas (LERMEN et al., 2021).

Nesta revisão, os autores compilaram estudos recentes que investigam diversos tipos de resíduos agroindustriais, como cascas de frutas, bagaço de cana-de-açúcar, cascas de arroz, entre outros, como potenciais materiais adsorventes. Esses resíduos são selecionados por sua disponibilidade abundante, baixo custo e capacidade de interação com o corante por meio de processos de adsorção.

No âmbito da agricultura, o Brasil destaca-se por possuir uma extensa área de produção e uma diversidade de condições climáticas ao longo de sua extensão territorial, obtendo assim diferentes tipos de resíduos ou sub-resíduos imagináveis para a produção de biomassa ou até mesmo o biochar.

A importância dessa abordagem reside na valorização de resíduos agroindustriais como uma fonte alternativa de materiais adsorventes, promovendo uma solução economicamente viável para o tratamento de efluentes industriais, especialmente em regiões onde esses resíduos são abundantes.

2.9 Espectrofotometria de derivadas aplicada a corantes

A espectrofotometria derivativa tem sido utilizada como ferramenta para determinar a relação entre a intensidade da cor e a concentração de corantes, permitindo análises mais precisas. Pesquisas demonstram sua aplicação na avaliação do corante extraído da rúbia, planta historicamente empregada como fonte de corantes naturais para o tingimento de tecidos e outros materiais (GHANEAN; GHANBAR AFJEH, 2016).

Neste estudo, foi realizada uma investigação utilizando espectrofotometria de derivadas, uma técnica analítica que permite uma avaliação mais precisa das características espectrais dos corantes, a fim de entender os resultados para diversas concentrações do corante em soluções aquosas, na qual mediram suas absorções em comprimentos de onda específicos e em seguida, aplicaram a espectrofotometria derivada para analisar as mudanças nas características espectrais em relação à concentração do corante, levando em consideração do ensaio de 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da concentração do corante.

Os resultados demonstraram uma relação linear entre a intensidade de cor, representada pela absorbância em determinado comprimento de onda, e a concentração do corante de rubia nas soluções aquosas. A partir de gráficos gerados do ensaio, essa correlação ficou mais clara identificando na curva de calibração, possibilitando a determinação precisa da concentração do corante com base na intensidade de cor medida.

A aplicação da espectrofotometria de derivadas permite não apenas a determinação da concentração do corante, mas também a avaliação da pureza e qualidade dos extratos corantes utilizados em diversas aplicações, incluindo na indústria têxtil e de alimentos.

Em suma, este artigo contribui para o entendimento da relação entre a intensidade de cor e a concentração de corantes, evidenciando a importância da espectrofotometria de derivadas como um equipamento analítico para estudos na área de corantes e pigmentos naturais.

2.10 Espectrofotometria de derivadas aplicada a corantes

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) tem sido empregada como ferramenta analítica para a investigação de biofilmes microbianos, possibilitando a obtenção de informações detalhadas sobre sua composição bioquímica e estrutura. Essa técnica permite análises não destrutivas de materiais biológicos, além de contribuir para a compreensão de suas interações (SCHMITT; FLEMMING, 1994).

Portanto, é descrito no texto dois tipos de espectroscopia FTIR, sendo elas a aplicação no contexto da análise microbiana, onde o FTIR tem sido amplamente utilizada para identificar e classificar microrganismos com base em suas assinaturas espectrais únicas. Essa técnica permite a identificação rápida de bactérias, fungos e outros microrganismos, facilitando o diagnóstico de infecções, monitoramento de processos biotecnológicos e controle de qualidade em indústrias farmacêuticas e alimentícias. Outra maneira é pela análise microbiana, na qual o equipamento FTIR é aplicada extensivamente na caracterização de materiais. Ela permite a identificação de compostos orgânicos e inorgânicos em amostras sólidas, líquidas e gasosas.

Alavancando os princípios básicos da espectroscopia FTIR, incluindo a interação da radiação infravermelha com as amostras e a interpretação dos espectros resultantes. Também são abordadas as vantagens e limitações dessa técnica, destacando sua aplicabilidade em uma ampla gama de campos científicos e industriais.

2.11 Avanços em modelos de adsorção de corantes

Avanços recentes nos modelos cinéticos de adsorção têm ampliado a compreensão dos mecanismos envolvidos na remoção de diferentes tipos de corantes em soluções aquosas. Estudos destacam os principais modelos utilizados para descrever a velocidade de adsorção, bem como os processos de transferência de massa associados, avaliando sua adequação na interpretação de dados experimentais. Essa abordagem contribui para o aprimoramento e a otimização de sistemas aplicados ao tratamento de efluentes coloridos (BENJELLOUN et al., 2020).

A adsorção é um método amplamente utilizado para a remoção de corantes devido à sua eficiência e custo relativamente baixo. Sendo assim, os autores

discutem os principais modelos cinéticos de adsorção, como os modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Elovich e de difusão intrapartícula, entre outros. Dessa forma, os modelos apresentados são fundamentais para entender os mecanismos e a eficiência do processo de adsorção, permitindo otimizar as condições de operação e selecionar os melhores adsorventes para cada tipo de corante.

Portanto, foi classificado que o exemplar pseudo-primeira ordem (baseado na teoria de Lagergren), é frequentemente aplicado para processos em que a taxa de adsorção é proporcional ao número de sites não ocupados no adsorvente. Em contrapartida, o modelo de pseudo-segunda ordem (desenvolvido por Ho e McKay), assume que a adsorção é um processo de quimissorção, envolvendo a troca ou compartilhamento de elétrons entre adsorvente e adsorbato.

Já o modelo Elovich é particularmente útil para sistemas heterogêneos onde a adsorção não segue uma única ordem cinética, enquanto o modelo de difusão intrapartícula considera a influência da difusão dentro das partículas de adsorvente.

Por fim, o artigo destaca a importância de selecionar o modelo cinético adequado com base nas características específicas dos corantes e dos adsorventes utilizados, como por exemplo os corantes ácidos, básicos, reativos e diretos, podem interagir de maneiras distintas com os adsorventes, influenciando a eficiência e a adsorção. Além disso, fatores como a superfície específica do adsorvente, a porosidade e a presença de grupos funcionais ativos são cruciais para a eficácia do processo de adsorção. Na qual, os avanços recentes mencionados incluem o desenvolvimento de novos adsorventes baseados em materiais nanoestruturados, biopolímeros e resíduos agrícolas modificados. Esses novos materiais apresentam vantagens significativas em termos de capacidade de adsorção e seletividade, além de serem mais sustentáveis e econômicos.

2.12 Biomassa de casca de limão como adsorvente

A biomassa da casca de limão Taiti (*Citrus latifolia*) tem sido avaliada como adsorvente natural para a remoção do corante azul de metileno em soluções aquosas, apresentando potencial como alternativa sustentável no tratamento de efluentes. O azul de metileno é amplamente utilizado em diferentes setores industriais, especialmente no segmento têxtil, e sua presença em efluentes constitui

um problema ambiental relevante devido à sua toxicidade e persistência no meio ambiente (COSTA; MELO, 2018).

Os autores conduziram uma série de experimentos para avaliar a capacidade de adsorção da casca do limão Taiti, explorando diferentes parâmetros como pH, tempo de contato, concentração inicial do corante e dose do adsorvente. A casca de limão Taiti foi escolhida por ser um resíduo agrícola abundante e de baixo custo.

Obtendo por sua vez, como resultados mostraram que a eficiência de remoção do azul de metileno pelo adsorvente em questão, é influenciada pelo pH da solução, sendo que a adsorção máxima ocorreu em pH alcalino. Além disso, o aumento da dose de adsorvente levou a uma maior remoção do corante, enquanto a concentração inicial de azul de metileno afetou a quantidade de corante adsorvida por unidade de massa de casca de limão. A cinética de adsorção utilizada foi pelos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, com os dados experimentais ajustando-se melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem. Isso sugere que o processo de adsorção é quimisorção, envolvendo interações entre o corante e os grupos funcionais presentes na superfície da casca de limão.

Foi concluído que a biomassa da casca de limão Taiti é um adsorvente eficaz para a remoção de azul de metileno de soluções aquosas, apresentando potencial para aplicação em sistemas de tratamento de águas residuais. A utilização desse resíduo agrícola não apenas oferece uma solução de baixo custo para a descontaminação de efluentes, mas também abre caminho para novas investigações sobre a aplicação de outros resíduos agrícolas, promovendo práticas ambientais mais sustentáveis e econômicas.

2.13 Remoção de Direct Green 26 por serragem

A serragem de madeira tem sido avaliada como adsorvente natural de baixo custo para a remoção do corante Direct Green 26 em soluções aquosas que simulam efluentes da indústria têxtil. Considerando que o setor têxtil brasileiro gera grandes volumes de efluentes contendo elevadas concentrações de corantes e compostos químicos, os quais podem causar impactos ambientais e riscos à saúde quando descartados sem tratamento adequado, alternativas acessíveis tornam-se necessárias. Resultados experimentais demonstram que a serragem apresenta elevada capacidade de remoção do corante, indicando seu potencial como material promissor para o tratamento de efluentes (ANTUNES et al., 2010).

A partir da série de experimentos para avaliar a capacidade de adsorção da serragem de madeira, considerando diversos parâmetros, como pH, tempo de contato, concentração inicial dos corantes e quantidade de adsorvente utilizado. A escolha da serragem de madeira se deve à sua abundância, baixo custo e propriedades adsorventes naturais, oferecendo uma solução sustentável. Dessa forma, os resultados mostraram que a serragem de madeira é eficaz na remoção de corantes, com a eficiência de adsorção sendo significativamente influenciada pelo pH da solução. Observou-se que a adsorção é mais eficiente em pH ácido, o que sugere que a carga superficial da serragem e a ionização dos corantes desempenham um papel crucial na interação adsorvente-adsorvato.

A cinética de adsorção foi analisada utilizando os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, sendo que os dados experimentais se ajustaram melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem. Isso indica que o processo de adsorção é predominantemente controlado por quimiossorção, envolvendo interações químicas específicas entre os corantes e os grupos funcionais presentes na serragem de madeira.

Os autores concluíram que a serragem de madeira é um adsorvente promissor para o tratamento de efluentes têxteis, pois, os resultados indicaram que a remoção média de corante, utilizando serragem, foi de 78,8% para uma concentração inicial de 500mg/L e a capacidade máxima de adsorção de 119mg/g. Esses resultados demonstram grande potencial da serragem como adsorvente para o corante Direct Green 26.

2.14 Biochar modificado para adsorção de ECs

O biochar modificado tem sido amplamente investigado como material adsorvente para a remoção de contaminantes emergentes presentes em águas e efluentes. Esses contaminantes correspondem a um grupo de poluentes geralmente encontrados em baixas concentrações, porém com elevada toxicidade, incluindo fármacos, produtos de cuidados pessoais, pesticidas e outros compostos orgânicos sintéticos. Representando potencial de persistência no ambiente, podendo se bioacumular em organismos aquáticos e, posteriormente, atingir seres humanos, configurando risco à saúde pública (CHENG et al., 2021).

Nesta revisão, os métodos recentes de modificação de biochar usados na remoção de ECs são primeiramente resumidos, e o desempenho e os mecanismos

de adsorção do biochar modificado em CEs típicos são depois revisados sistematicamente. O biochar é produzido a partir da pirólise de biomassa e pode ser modificado por tratamentos físicos, químicos ou biológicos para melhorar suas propriedades de adsorção.

Os resultados revisados demonstram que o biochar modificado apresenta uma alta eficiência na remoção de contaminantes emergentes devido à sua superfície porosa e à presença de grupos funcionais que promovem interações específicas com os compostos alvo. Os estudos abordam diferentes parâmetros que influenciam a adsorção, como pH da solução, tempo de contato, concentração inicial do contaminante e temperatura.

Contudo, destaca os mecanismos de adsorção envolvidos no processo, incluindo adsorção por pontes de hidrogênio, interações π - π , interações dipolo-dipolo e formação de complexos de coordenação. Além disso, são discutidas as vantagens do uso de biochar modificado em relação a outros adsorventes convencionais, como carvão ativado, devido à sua disponibilidade, baixo custo e potencial de valorização de resíduos agrícolas e florestais.

2.15 Tecnologias de pirólise para produção de biochar

As tecnologias de pirólise e os diferentes tipos de matérias-primas utilizadas nesse processo têm sido amplamente estudados, especialmente no que se refere à combinação de plásticos e biomassa como estratégia para otimizar o rendimento de biochar. A pirólise consiste em um processo termoquímico no qual materiais orgânicos são decompostos em elevadas temperaturas, na ausência de oxigênio, resultando na formação de bio-óleo, gases e biochar. Evidências indicam que a co-pirólise pode alterar as propriedades físico-químicas do biochar produzido, ampliando seu potencial de aplicação em diferentes contextos ambientais (AL-RUMAIHI et al., 2021).

Desse modo, fomenta a importância crescente da pirólise como uma solução sustentável para o tratamento de resíduos, principalmente devido à sua capacidade de converter resíduos em produtos valiosos e energeticamente ricos. Os autores realizam uma análise abrangente das diferentes tecnologias de pirólise, incluindo pirólise lenta, rápida e flash, cada uma com características específicas de temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento que influenciam diretamente os rendimentos e as propriedades dos produtos obtidos. A revisão

detalha as vantagens e desvantagens de cada método, proporcionando uma base para entender qual tecnologia pode ser mais adequada dependendo do tipo de matéria-prima e dos objetivos desejados.

Além disso, também foi investigado formas de modificação para uma otimização da eficiência do processo de pirólise e a qualidade do biochar produzido, com o auxílio da mistura de plásticos com biomassa. A mistura desses materiais pode melhorar as propriedades do biochar, como a porosidade e a área de superfície específica, tornando-o mais eficiente para aplicações como adsorvente de poluentes, melhorador de solo e meio de armazenamento de carbono.

Conclui-se, que uma abordagem personalizada, adaptada às necessidades específicas de cada aplicação, pode levar a avanços significativos.

2.16 Remoção de metais pesados por biomassa vegetal

O bagaço de cana-de-açúcar tem sido avaliado como adsorvente natural para a remoção de mercúrio em soluções aquosas, demonstrando potencial como alternativa sustentável no tratamento de efluentes contaminados por metais pesados. O mercúrio é um elemento altamente tóxico e sua presença em águas residuais representa significativo risco ambiental e à saúde pública, o que reforça a necessidade de métodos eficazes de remoção. Resultados indicam que esse resíduo agroindustrial pode atuar como material de baixo custo e eficiente na adsorção de metais pesados em sistemas aquosos (SANTACRUZ, 2019).

Nas metodologias usadas temos experimentos para avaliar a capacidade do bagaço de cana-de-açúcar em adsorver mercúrio, explorando diferentes condições operacionais como pH, tempo de contato, concentração inicial de mercúrio e dose do adsorvente. A escolha do bagaço de cana, se submeteu por ser um subproduto abundante e de baixo custo da indústria sucroalcooleira, onde suas propriedades adsorventes e potencial de reutilização se alinham a práticas de sustentabilidade e economia circular.

Portanto, os resultados indicaram que o bagaço de cana-de-açúcar possui uma alta eficiência na remoção de mercúrio, com a adsorção sendo fortemente influenciada pelo pH da solução. A maior eficiência de remoção foi observada em pH ácido, o que sugere a importância das condições químicas do meio na performance do adsorvente. A capacidade de adsorção aumentou com a maior dose de bagaço de cana e diminuiu com a elevação da concentração inicial de mercúrio, devido à

saturação dos sítios de adsorção. A partir da cinética de adsorção, se teve a solução mais bem descrita pelo modelo de pseudo-segunda ordem, indicando que o processo de adsorção é predominantemente controlado por quimissorção, envolvendo interações químicas entre o mercúrio e os grupos funcionais presentes no bagaço de cana. Além disso, as isotermas de adsorção foram bem ajustadas ao modelo de Langmuir, sugerindo a formação de uma monocamada de mercúrio na superfície do adsorvente e a homogeneidade dos sítios ativos.

Ademais, foi realizado a modificação do adsorvente pela exposição a plasma de gases reativos. Para tal, foi utilizado um reator de aço inoxidável, de aproximadamente 6 L de volume, equipado por dois eletrodos horizontais, circulares e de placas paralelas, de aproximadamente 10 cm de diâmetro.

O tratamento a plasma foi baseado principalmente no estudo de Mohammed; Jeelani e Rangari (2021), e Resende e colaboradores (2018), tendo especial atenção na incorporação do flúor num material orgânico e em melhorar as características físicas do adsorvente, por essa razão neste trabalho foram aplicadas três potências RF de 80 W, 190 W ou 300 W ao eletrodo inferior, enquanto o eletrodo superior foi ligado à terra. Foram estudados 3 tempos de tratamento (2, 30 e 60 min).

Por fim, concluem que o bagaço de cana-de-açúcar é um adsorvente promissor para a remoção de mercúrio de águas contaminadas, e os resultados deste trabalho mostram que o uso da técnica de plasma de baixa temperatura de SF₆ pode ser usada com sucesso para melhorar as características do SB e assim promover uma melhor adsorção de íons de mercúrio em solução aquosa, quando se utiliza pH de 7.

3 ANÁLISE COMPARATIVA

3.1 Contextualização corante da indústria têxtil

Os artigos "A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes", artigo 1 deste documento, e "Impactos ambientais gerados pelos resíduos têxteis no Brasil e alternativas para o futuro: uma revisão sistemática", artigo 2 deste documento, abordam a problemática dos corantes como efluentes da indústria têxtil no Brasil, destacando seus significativos impactos ambientais.

O primeiro artigo oferece uma análise detalhada e técnica dos métodos de tratamento de efluentes, discutindo tecnologias existentes e emergentes, como processos físico-químicos e biológicos, enquanto o segundo artigo amplia a discussão para incluir práticas sustentáveis e inovações futuras, como o uso de corantes biodegradáveis e tecnologias verdes, além de enfatizar a necessidade de políticas públicas rigorosas.

Desta maneira, enquanto o primeiro artigo é mais técnico e focado na descrição das características dos corantes e suas propriedades tóxicas, o segundo apresenta uma visão mais abrangente e estratégica, incluindo estudos de caso e dados. Juntos, os artigos fornecem uma visão abrangente do problema e das possíveis soluções, combinando tecnologia avançada com práticas sustentáveis e políticas públicas, destacando a necessidade de uma abordagem incisiva para mitigar os impactos ambientais da indústria têxtil.

3.2 Comprovação do problema do projeto e como ele afeta a biota

Os artigos "Avaliação do risco ecogenotoxicológico da utilização de corantes têxteis (tese)", artigo 3 deste documento, e "Toxicological and behavioral responses as a tool to assess the effects of natural and synthetic dyes on zebrafish early life", artigo 4 deste documento. Onde, investigam os impactos dos corantes têxteis, mas com focos e abordagens distintas na comprovação do problema e seus efeitos na biota.

A tese sobre o risco ecogenotoxicológico avalia a toxicidade dos corantes têxteis através de testes que medem mutagenicidade, genotoxicidade e outros efeitos adversos em uma variedade de organismos aquáticos e terrestres, oferecendo uma visão abrangente e ecossistêmica dos riscos ambientais.

Por outro lado, o quarto artigo foca nos efeitos tóxicos e comportamentais de corantes naturais e sintéticos especificamente em estágios iniciais de vida do peixe-zebra, utilizando este organismo como bioindicador para medir a toxicidade. Esta abordagem fornece dados detalhados sobre alterações comportamentais e de desenvolvimento, demonstrando de forma clara e específica como os corantes afetam a biota em nível individual.

Portanto, é possível verificar que é proporcionado uma visão mais generalizada e ecossistêmica dos impactos dos corantes têxteis, e no posterior oferece uma análise detalhada, centrada em um modelo animal.

Ambos os artigos, embora com abordagens diferentes, sublinham a gravidade dos corantes como poluentes ambientais e como eles modificam a vida da biota como um todo, evidenciando a necessidade urgente de regulamentação e métodos de tratamento mais eficazes para mitigar o meio ambiente.

3.3 Contextualização biomassa e maneiras de desenvolver um adsorvente sustentável

Os artigos "Remoção do corante azul de metileno de solução aquosa usando biomassa de pele prata de café (coffee silverskin) como bioadsorvente de baixo custo", artigo 5 deste documento ; "Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos para remoção de corantes: uma revisão", artigo 6 deste documento ; "Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse", artigo 7 deste documento; e "A utilização de resíduos agroindustriais para adsorção do corante azul de metileno: uma breve revisão", artigo 8 deste documento. Exploram o uso de biomassa e resíduos agroindustriais como adsorventes sustentáveis para a remoção de corantes, especificamente o azul de metileno, de soluções aquosas.

O quinto artigo avalia a eficácia da pele prata de café como um bioadsorvente de baixo custo, destacando sua capacidade de adsorção e aplicabilidade prática. O sexto artigo oferece uma revisão abrangente sobre diversos bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos, enfatizando as vantagens, desafios e perspectivas futuras de cada material. O sétimo artigo investiga o biochar derivado do bagaço de cana-de-açúcar digerido anaerobicamente, focando nas suas propriedades estruturais e eficiência na remoção de corantes. Por fim, o oitavo artigo revisa o uso de vários resíduos agroindustriais para a adsorção do corante azul de metileno, destacando a viabilidade e a sustentabilidade desses materiais.

Em conjunto, esses artigos demonstram que a utilização de biomassa e resíduos agroindustriais não só oferece uma solução econômica e ecológica para o tratamento de efluentes, mas também promove a valorização de resíduos, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias de adsorção mais sustentáveis e eficientes, reafirmando assim o uso eficiente da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar como adsorvente de corante azul de metileno.

3.4 Métodos Analíticos - Equipamento FTIR

Os artigos "Application of Derivative Spectrophotometry to Determine the Relation Between Color Intensity and Dye Concentration of Madder", artigo 9 deste documento; e "Investigation into biofilms by FTIR spectroscopy", artigo 10 deste documento; abordam métodos analíticos para estudar compostos específicos, utilizando técnicas de espectroscopia, mas com diferentes focos e aplicações.

O nono artigo utiliza a espectrofotometria derivada para estabelecer a relação entre a intensidade da cor e a concentração de corante de Madder, demonstrando como essa técnica pode ser aplicada para quantificar corantes em soluções com precisão. Analisando os corantes e sua quantificação através de mudanças na absorção de luz.

Em contrapartida, o décimo artigo discorre sobre os biofilmes utilizando espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), uma técnica que permite a análise detalhada da composição química e das interações moleculares dentro dos biofilmes.

Conjuntamente os artigos, exemplificam a versatilidade das técnicas espectroscópicas em diferentes contextos, mas enquanto o primeiro foca na quantificação de corantes, o segundo enfatiza a análise composicional de sistemas biológicos complexos utilizando FTIR, destacando a capacidade dessa técnica em revelar detalhes moleculares e estruturais. Embasando dessa forma o projeto futuro na utilização do equipamento em questão.

3.5 Métodos Analíticos - Adsorção

Os artigos "Recent Advances in Adsorption Kinetic Models: Their Application to Dye Types", artigo 11 deste documento; "Estudo da capacidade de remoção de Azul de Metileno pela biomassa de casca de limão taiti", artigo 12 deste documento; e "Estudo da utilização de serragem de madeira como adsorvente para tratamento

de efluentes têxteis", artigo 13 deste documento. Debate métodos analíticos de adsorção, cada um focando em diferentes aspectos e materiais.

O décimo primeiro artigo apresenta uma revisão dos avanços recentes nos modelos cinéticos de adsorção, explorando como esses modelos são aplicados a diferentes tipos de corantes, destacando a importância da compreensão das cinéticas de adsorção para otimizar processos de remoção de corantes.

Em contraste, o décimo segundo artigo investiga especificamente a capacidade de remoção do corante azul de metileno utilizando a biomassa da casca do limão Taiti, aplicando modelos cinéticos para avaliar a eficiência e a dinâmica do processo de adsorção.

O décimo terceiro artigo, por sua vez, estuda a utilização de serragem de madeira como adsorvente para tratamento de efluentes têxteis, também utilizando modelos cinéticos para compreender a eficácia e os mecanismos de adsorção envolvidos.

Comparativamente, observamos que temos uma visão teórica abrangente sobre os modelos cinéticos de adsorção aplicados a diversos corantes, e os outros demonstram a aplicação desses conceitos teóricos a materiais específicos, demonstrando experimentalmente a viabilidade e a eficiência da casca de limão e da serragem de madeira como adsorventes. Portanto, todos os artigos ressaltam a importância dos métodos analíticos de adsorção na avaliação e exemplificam a utilização deles.

3.6 Modificação do biochar

Os artigos "Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review", artigo 14 deste documento; "A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield", artigo 15 deste documento; e "Reaproveitamento de bagaço de cana de açúcar para remoção de mercúrio em soluções aquosas", artigo 16 deste documento. Desenvolvem o tema da modificação e aplicação de biochar para a remoção de contaminantes, cada um com enfoques específicos.

O décimo quarto artigo, revisa a utilização de biochar modificado para adsorção de contaminantes emergentes em água e efluentes, destacando como diferentes modificações químicas e físicas podem aumentar a capacidade de

adsorção do biochar, tornando-o mais eficiente na remoção de uma variedade de poluentes.

O décimo quinto artigo, fornece uma análise das tecnologias de pirólise e dos diferentes materiais de alimentação, explorando como a mistura de plásticos e biomassa pode ser otimizada para maximizar a produção de biochar com características desejáveis, enfatizando o papel da modificação durante a pirólise para obter um biochar de alta qualidade.

Já o décimo sexto artigo, foca na aplicação prática do bagaço de cana-de-açúcar para a remoção de mercúrio de soluções aquosas, demonstrando a eficácia desse material como adsorvente sem modificação prévia, mas sugerindo que modificações futuras poderiam melhorar ainda mais sua capacidade de adsorção. Dessa forma demonstrou resultados significativos após a modificação realizada pelo plasma.

Em comparação, todos os artigos sublinham a importância das modificações, mesmo que distintas no biochar, para aumentar sua eficiência como adsorvente, destacando diferentes aplicações para enfrentar desafios ambientais.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção do material adsorvente

A biomassa foi proveniente de resíduos da indústria sucroalcooleira e da indústria de celulose e papel. Dessa forma, a técnica utilizada foi ajustada a partir de Yaashikaa et al. (2022). Inicialmente, o material foi seco em estufa a 100 °C durante 2 horas, com o objetivo de remover a umidade, favorecendo seu armazenamento e prevenindo a formação de mofo. Em seguida, a biomassa foi submetida à moagem inicial em moinho de facas, a fim de reduzir o tamanho das partículas de maneira mais grosseira. Posteriormente, o material foi refinado em moedor de café até atingir granulometria fina. Para garantir a uniformidade das partículas, a biomassa foi peneirada em uma malha de 45 µm. Por fim, o material processado foi armazenado em recipiente plástico devidamente vedado, permanecendo acondicionado até sua utilização nos experimentos.

4.2 Produção do biochar

O método utilizado foi adaptado de Yaashikaa et al. (2022), é necessário pesar 100 g de biomassa de bagaço de cana-de-açúcar (BC), assim foi depositada a massa em um “reator” montado com 2 cadinhos de cerâmica médios. Portanto foi separado em dois ensaios, onde foi realizada pirólise em um forno mufla a uma temperatura de 400° C e 700° C por 2h, posteriormente o sistema foi resfriado durante 12h, deste processo foi obtido tanto o biochar de bagaço de cana-de-açúcar pirolisado a 400° C (BBC - 400°C) quanto o biochar de bagaço de cana-de-açúcar pirolisado a 700°C (BBC - 700°C).

4.3 Produção biochar modificado com adição de ferro

A produção de biochar modificado com adição de ferro foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Monteiro et al. (2018), com algumas adaptações para atender às especificidades deste estudo. Inicialmente, uma balança de precisão foi utilizada para pesar 5 g de biomassa de cana-de-açúcar e 40,5 g de materiais com elevado teor de ferro, sendo eles a lama vermelha do Pará de 2019 (LVP), lama vermelha da região da cidade de alumínio no período do ano de 2015 (LVCBA) e cloreto de ferro (FeCl_3).

Posteriormente, cada um dos materiais pesados foi diluído em água ultrapura em balões volumétricos de 100 mL, completando-se o volume até o menisco. Em

seguida, 12 mL da solução diluída foram transferidos para um béquer de 1000 mL contendo a biomassa previamente pesada, permitindo a completa imersão e embebição da solução na biomassa.

Após a mistura, o sistema foi deixado em repouso por 2 horas e, em seguida, aquecido em estufa a 80°C por mais 2 h, sendo feita a homogeneização do material após 1 hora de exposição ao calor.

Concluída esta etapa, o material foi transferido para cadinhos de porcelana, que atuaram como reatores, e submetido a pirólise em uma mufla a temperaturas de 400°C e 700°C por 2 horas. Ao final do processo, o biochar obtido foi devidamente armazenado em frascos apropriados para sua conservação e feito o teste com o ímã ao redor do vidro, observando o magnetismo.

4.4 Preparação das Soluções de Corantes

De acordo com a metodologia descrita por Jesus et al. (2014), foi estabelecido o processo de preparação das soluções do corante para os ensaios de adsorção e as curvas de calibração dos corantes Remazol Azul RGB, Bimagnativ Azul SV-DR; Remazol Marinho RGB 150% GRAN, Remazol Amarelo Ouro RGB (Reactive Yellow 107), Remazol Amarelo RR GRAN, Reactive Red 195 e Remazol Laranja Ultra RGB, de acordo com a metodologia foi utilizado 0,200 g ($\pm 0,01$ g) de RM 500°C com 50 mL de uma solução de RB 19 com as seguintes concentrações: 100, 500, 1.000, 2.000, 3.000 e 5.000 mgL⁻¹, porém foi realizado a diminuição das concentrações para adequação ao estudo.

Portanto, as soluções foram montadas contendo 0.0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, e 0.05 g/L de solução de corante, em um balão volumétrico de 25 mL.

Tabela 1 – Especificação da concentração.

	Concentração [g/L]	Volume de corante [mL]	Volume de água [mL]
C1	0,01	1/2 = 0,5	4,5
C2	0,02	2/2 = 1,0	4
C3	0,03	3/2 = 1,5	3,5
C4	0,04	4/2 = 2	3
C5	0,05	5/2 = 2,5	2,5

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

4.5 Procedimento para ensaio da adsorção

Se deu início ao ensaio retirando uma alíquota de cada solução montada anteriormente e realizando a medição no equipamento espectrofotômetro, no qual é possível visualizar a curva do espectro na região visível, seção de 590 nm (SOUZA; ANTUNES, 2021) (GHANEAN; GHANBAR AFJEH, 2022).

Posteriormente em cada solução foi adicionado uma Espátula Com Micro Colher Em Arame De Aço Inox 304, Diâmetro 5mm, de biochar de bagaço de cana-de-açúcar (BBC), do biochar modificado com lama vermelha do Pará (BBC - LVP), lama vermelha da CBA (BBC - LVCBA) e com cloreto de ferro (BBC - FeCl_3), onde foi mantido por 48 h. Para comparação, o mesmo procedimento foi executado com carvão ativado comercial.

Após esse período foi retirado uma amostra de cada solução e realizado a leitura no equipamento Espectrofotômetro de UV-Vis (Ultravioleta-Visível). A eficiência de remoção será avaliada medindo a eficiência de remoção (%) de concentração de corante adsorvida (mg/L) comparada a concentração inicial (mg/L) (SOUZA; ANTUNES, 2021).

4.6 Preparo das soluções com regulação de pH

Segundo o estudo realizado por Souza et al. (2023), foi destacado a influência do PH nos experimentos de adsorção, sendo assim demais amostras foram realizadas com a seguintes concentrações de corante 0.0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.07, 0.1 e 0.05 g/L de solução de corante, em um balão volumétrico de 25 mL, e uma Espátula Com Micro Colher disposto cada biochar em uma concentração. Contudo foi regulado o PH em ácido, neutro e básico (entre os PH de 2, 6 e 10).

4.7 Caracterização dos materiais produzidos e Determinação do ponto de carga zero (pH_{pcz})

Nesta etapa o material produzido (biochar (BC), será caracterizado. O ponto de carga zero (do inglês Zero Point Charge, ZPC) representa valores de pH nos quais um ou mais dos componentes de superfície zeram (COSTA; MELO, 2022).

Deste modo, será utilizada metodologia proposta por Costa e Melo (2018) para determinação da carga superficial dos materiais produzidos. A biomassa de bagaço de cana-de-açúcar, biomassa e/ou modificado, foi pesado em balança analítica e colocado em contato com 50 ml de cada solução aquosas preparada,

num Erlenmeyer com capacidade de 125 ml, perfazendo um total de 12 soluções a diferentes pH's (1,0 a 12,0), para cada tipo de biomassa obtida.

Após colocação da mistura nos Erlenmeyer, estes foram lacrados com papel filme e transferidos para mesa agitadora, onde permaneceu, por 24h, sob agitação a 100 rpm e a 25°C. No fim das 24h de equilíbrio entre as fases sólida-líquida, as soluções foram filtradas e novamente feitas as análises para determinação dos pH's finais. O valor do PHpcz foi calculado pela média dos pontos em que o pH final foi praticamente constante.

4.8 Cinética de adsorção no intervalo de 24h

Este ensaio de adsorção foi realizado com o objetivo direcionado de quantificar a eficiência do Biochar FeCl₃ a 400° e Biochar FeCl₃ a 700° em contato com os sete corantes com a coleta de 8 tempos de alíquotas em 24h.

A metodologia seguida foi baseada por Rosita et al. (2022), com adequações ao estudo, no qual se iniciou com a preparação da solução do C1 – Corante Azul de metileno 1 vez diluído e 3 L de solução de Água Ultrapura com ajuste usando o tampão NaOH 0,1 M para chegar ao pH10.

Ambas as soluções foram despejadas em 12 Erlenmeyer, contendo 250 ml de pH 10 e 1 ml de Corante C1, montando em batelada um experimento em duplicata, em que foi variado a quantidade de material adsorvente adicionado, utilizando 0,50g, 1,00g e 1,50g do mesmo.

Este processo foi repetido para os demais tipos de adsorventes, totalizando 12 frascos, os quais foram lacrados com parafilme e levados à mesa agitadora com frequência padrão de 125 rpm. O tempo de contato entre a solução e o material adsorvente foi controlado para cada frasco, sendo definidos os intervalos de 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 12 h e 24 h, permitindo a avaliação da cinética de adsorção ao longo do tempo.

Para a coleta das alíquotas foi utilizado seringas de 5 ml para a retirada da alíquota do frasco, posteriormente foi encaixada a seringa ao pelo filtro membrana PES KASVI 0,45 µm de 30 mm e armazenados em tubos cônicos de polipropileno (tipo Falcon), com capacidade de 15 ml, subsequentemente foram lidas no Espectrofotômetro de UV-Vis (Ultravioleta-Visível) para a determinação da adsorção final.

A escolha das condições, ao qual foi realizado o experimento final, se deu ao desempenho eficiente nos demais experimentos anteriores realizados no estudo. O cenário, onde o pH e o material adsorvente estiverem em condições mais favoráveis para maximização da remoção do contaminante, será caracterizado como melhor desempenho em relação a uma situação real.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização teórica do biochar com base na Literatura

O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo de origem vegetal composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, cujas propriedades são favoráveis a aplicações ambientais, uma vez que exercem grande influência nas características do biochar gerado. De acordo com Ahmad et al. (2014), a biomassa possui grande porosidade, uma área superficial significativa e com uma estrutura mais alcalina. Durante o tratamento térmico de pirólise, obtemos transformações que acarretam a degradação das frações orgânicas mais instáveis, corroborando para a predominância do carbono e a formação de uma estrutura mais condensada e quimicamente estável. Dessa forma, a composição da superfície do biochar caracterizam-se como ricas em grupos funcionais compostos por oxigênio, como hidroxilas e carboxilas, possibilitando maior interação com corantes e metais pesados (LEHMANN, J.; JOSEPH, 2015). O conjunto dessas propriedades, justificam a atuação do biochar de bagaço de cana-de-açúcar, promovendo o em processos de adsorção de contaminantes (ZAFEER; MENEZES; VENKATACHALAM; BHAT, 2023).

5.2 Curvas de calibração obtidas a partir das soluções dos corantes

As curvas de calibração foram obtidas a partir de soluções padrões preparados em diferentes concentrações (0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05 g/L), referenciado na tabela 1.

As absorbâncias correspondentes foram determinadas em espectrofotômetro UV-Vis, registrando-se no comprimento de onda máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) para cada corante analisado. A linearidade das amostras foi quantificada com base na Lei de Beer-Lambert, que estabelece que a absorbância é diretamente proporcional à concentração da espécie absorvente em solução (SKOOG et al., 2014).

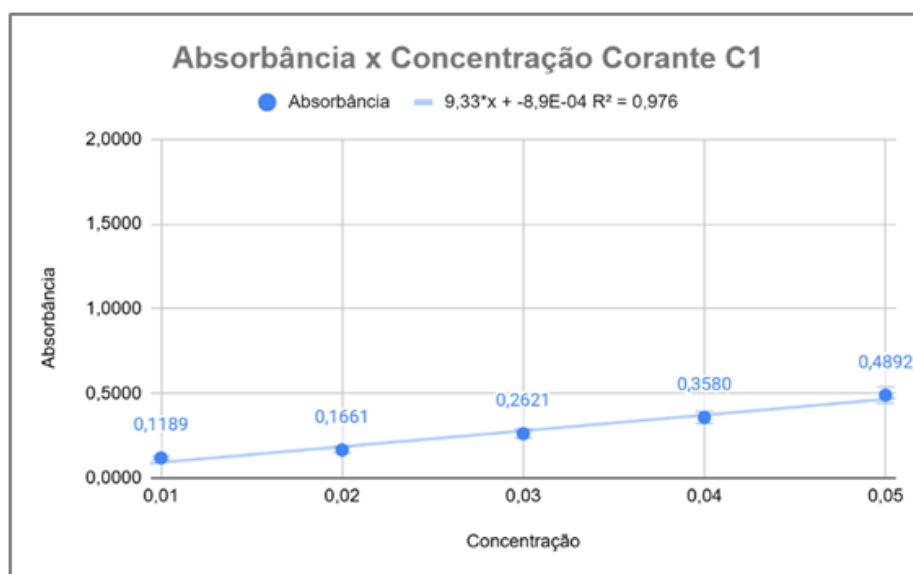
As Tabelas 2 a 8 apresentam os dados experimentais obtidos, e as Figuras 1 a 7 mostram as respectivas curvas de calibração.

Tabela 2 – Dados experimentais da curva de calibração para o corante (C1).

Concentração	Absorbância
0,01	0,1189
0,02	0,1661
0,03	0,2621
0,04	0,3580
0,05	0,4892

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 1 – Curva de calibração da absorbância em função da concentração para o corante C1.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

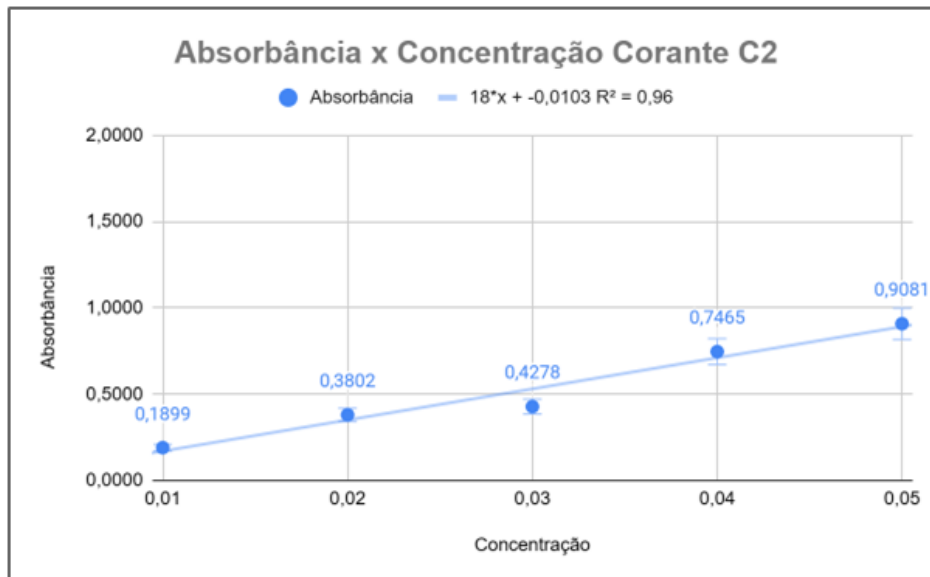
Na Figura 1, registrou o comprimento de onda máximo de 590 nm com uma curva de calibração linear, como apresentado na disposição da linha de tendência e dos pontos registrados no gráfico. Dessa forma, é possível identificar a correlação entre absorbância e concentração. A equação da reta obtida foi $y = 9,33 \cdot x + (-0,00089)$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,98.

Tabela 3 – Dados experimentais da curva de calibração para o corante (C2).

Concentração	Absorbância
0,01	0,1899
0,02	0,3802
0,03	0,4278
0,04	0,7465
0,05	0,9081

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 2 – Curva de calibração da absorbância em função da concentração para o corante C2



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

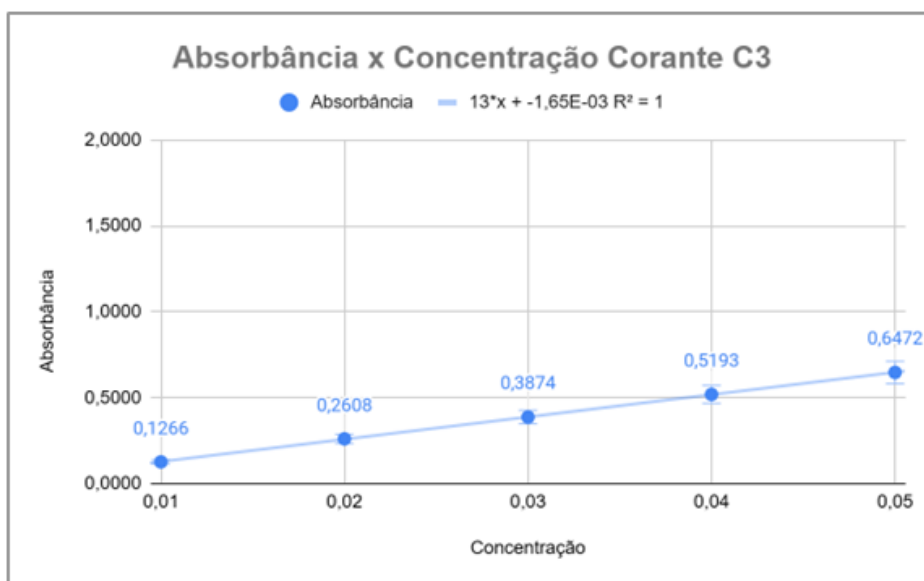
Na Figura 2, o comprimento de onda máximo que foi considerado é 414 nm. O gráfico apresenta boa linearidade demonstrado nos pontos redigidos de forma linear junto à linha de tendência, indicando uma relação direta entre a concentração e a absorbância. A equação da reta obtida foi $y = 18 \cdot x + (-0,0103)$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,96.

Tabela 4 – Dados experimentais da curva de calibração para o corante (C3).

Concentração	Absorbância
0,01	0,1266
0,02	0,2608
0,03	0,3874
0,04	0,5193
0,05	0,6472

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 3 – Curva de calibração da absorbância em função da concentração para o corante C3.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

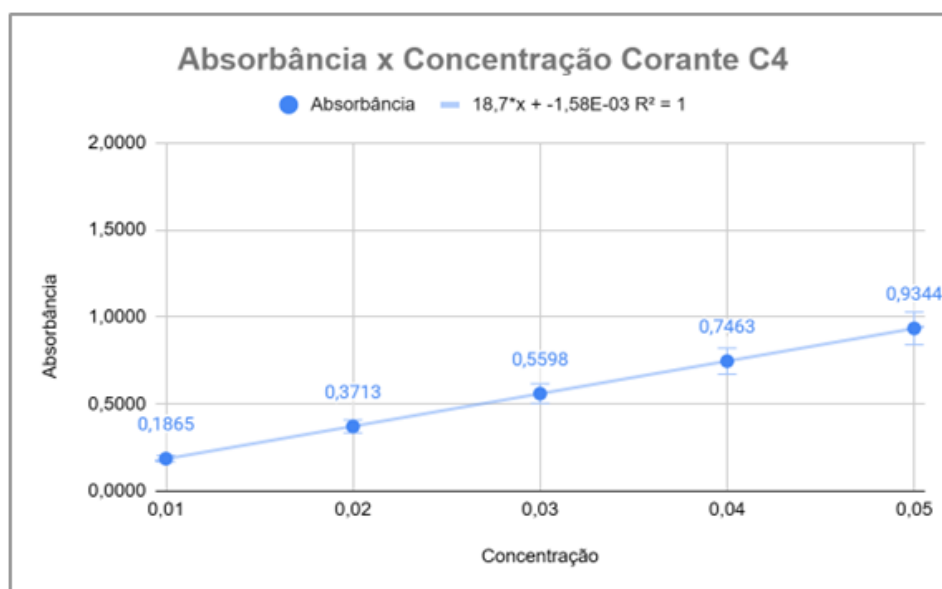
A Figura 3 representa a curva de calibração do corante C3, no qual o comprimento de onda máximo que foi considerado é 424 nm. A equação da reta obtida foi $y = 13 \cdot x + (-0,00165)$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 1, confirmando a precisão do método Lei de Beer-Lambert.

Tabela 5 – Dados experimentais da curva de calibração para o corante (C4).

Concentração	Absorbância
0,01	0,1865
0,02	0,3713
0,03	0,5598
0,04	0,7463
0,05	0,9344

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 4 – Curva de calibração da absorbância em função da concentração para o corante C4.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

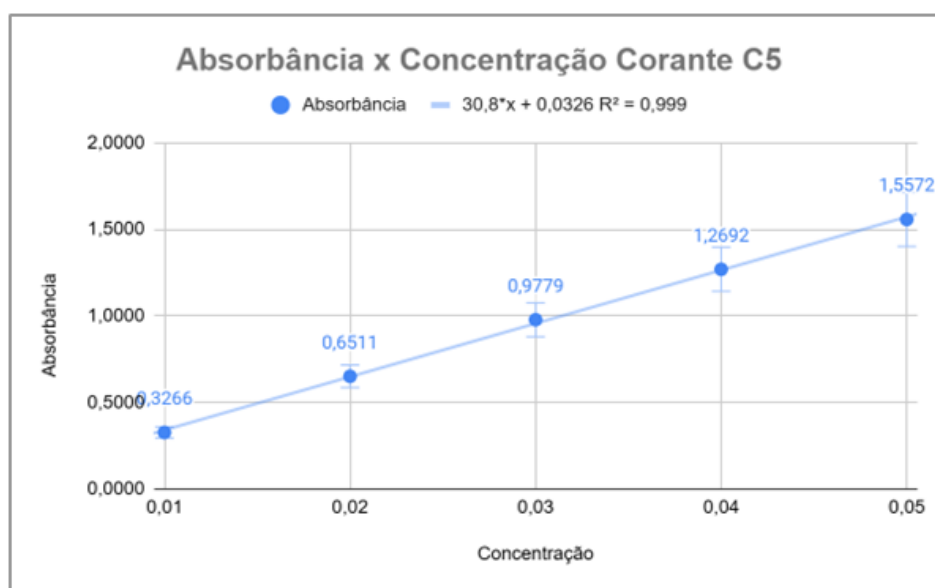
A Figura 4 apresenta a curva de calibração do corante C4, obtida no comprimento de onda máximo de 540 nm. A equação da reta ajustada foi $y = 18,7 \cdot x - 0,00158$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 1, indicando excelente correlação linear entre a concentração do corante e a absorbância.

Tabela 6 – Dados experimentais da curva de calibração para o corante (C5).

Concentração	Absorbância
0,01	0,3266
0,02	0,6511
0,03	0,9779
0,04	1,2692
0,05	1,5572

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 5 – Curva de calibração da absorbância em função da concentração para o corante C5.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

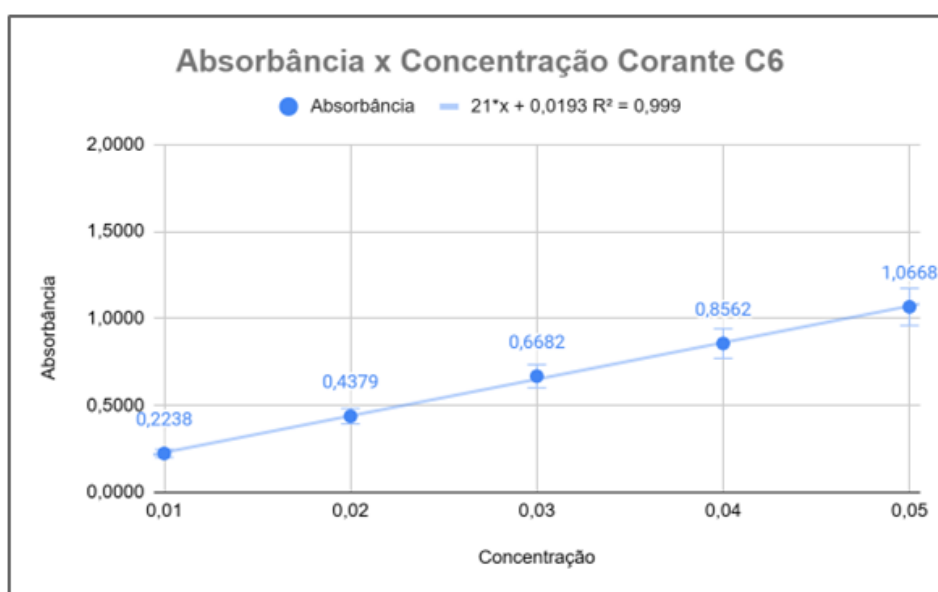
A Figura 5 apresenta a curva de calibração do corante C5, obtida no comprimento de onda máximo de 615 nm. A equação da reta ajustada foi $y = 30,8 \cdot x + 0,0326$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,999.

Tabela 7 – Dados experimentais da curva de calibração para o corante (C6).

Concentração	Absorbância
0,01	0,2238
0,02	0,4379
0,03	0,6682
0,04	0,8562
0,05	1,0668

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 6 – Curva de calibração da absorbância em função da concentração para o corante C6.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

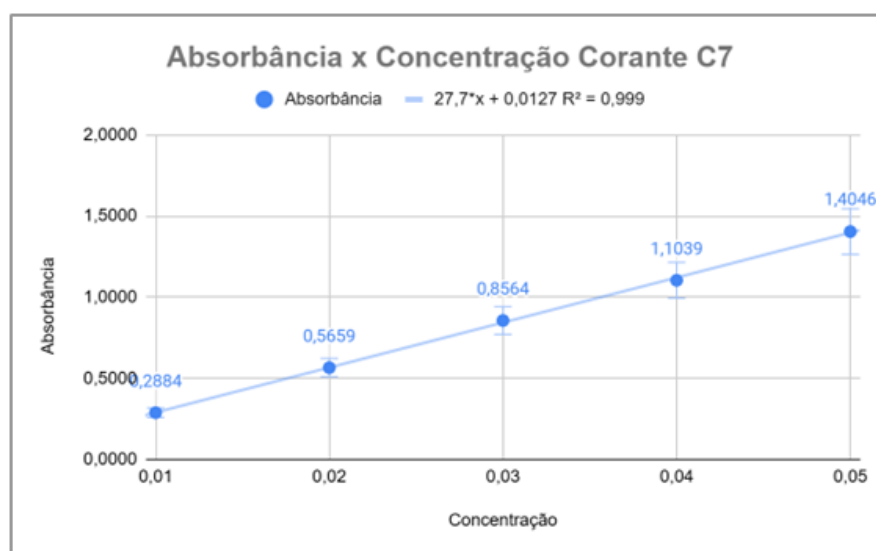
A Figura 6 apresenta a curva de calibração do corante C6, obtida no comprimento de onda máximo de 595nm. A equação da reta ajustada foi $y = 21 \cdot x + 0,0193$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,999.

Tabela 8 – Dados experimentais da curva de calibração para o corante (C7).

Concentração	Absorbância
0,01	0,2884
0,02	0,5659
0,03	0,8564
0,04	1,1039
0,05	1,4046

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 7 – Curva de calibração da absorbância em função da concentração para o corante C7.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A Figura 7 apresenta a curva de calibração do corante C7, obtida no comprimento de onda máximo de 418 nm. A equação da reta ajustada foi $y = 27,7 \cdot x + 0,0127$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,999.

De modo geral, as curvas de calibração obtidas para os diferentes corantes apresentaram comportamento linear, com elevados coeficientes de determinação R^2 próximos de 1. Esse resultado indica uma boa correlação entre a concentração e a absorbância, evidenciando a adequação dos comprimentos de onda selecionados para cada corante. Para facilitar a visualização, a Tabela 9 reúne os valores dos comprimentos de onda máximos determinados nas análises.

Tabela 9 – Comprimentos de onda e absorbâncias dos corantes analisados.

Nomenclatura	Corante	Comprimento de Onda (λ)
C1	Bimaginativ Azul SV-DR	590
C2	Remazol Amarelo Ouro RGB (Reactive Yellow 107);	414
C3	Remazol Amarelo RR GRAN;	424
C4	Reactive Red 195;	540
C5	Remazol Marinho RGB 150% GRAN;	615
C6	Remazol Azul RGB;	595
C7	Remazol Laranja Ultra RGB.	418

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

5.3 Experimento da eficiência dos filtros

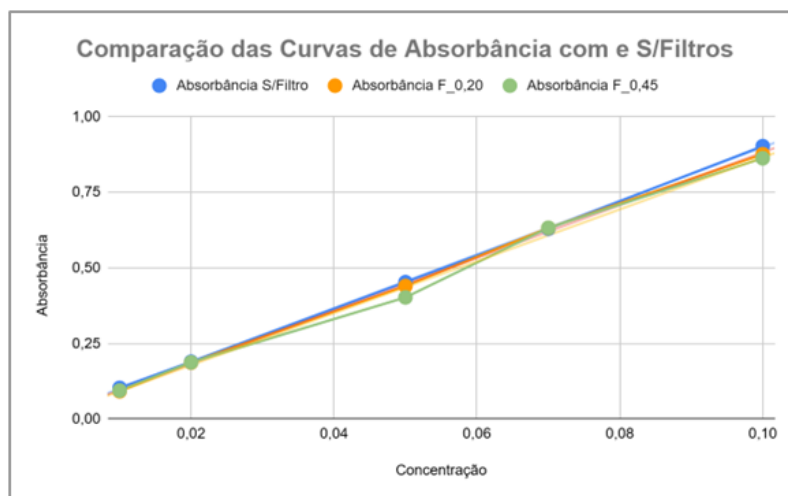
As amostras foram preparadas a partir do corante C1 com as devidas concentrações padrões (0,01, 0,02, 0,05, 0,07 e 0,1), onde posteriormente foram submetidas as filtragens com o filtro membrana PES KASVI 0,45 μm e filtro membrana PTFF 0,20 μm com o intuito de verificar se os filtros empregados nas amostras interferem na concentração de corante, identificando se ao passar a amostra pelo filtro retemos a coloração do contaminante. Conjuntamente ao processo, foi colhida alíquotas de cada concentração sem passar por nenhum tipo de filtragem, obtendo a concentração “inicial”. Por fim, todos os materiais coletados foram analisados em espectrofotômetro UV-Vis no comprimento de onda de 590 nm. Abaixo segue a tabela 10 com as absorbâncias dos corantes analisados e figura 8 demonstrando esses resultados.

Tabela 10 – Dados experimentais e curva de calibração das absorbâncias

Std	Concentração	Absorbância S/Filtro	Absorbância F_0,20	Absorbância F_0,45
1	0,01	0,1037	0,0923	0,0947
1	0,02	0,19	0,187	0,188
1	0,05	0,4529	0,4402	0,4026
1	0,07	0,6295	0,632	0,6326
1	0,1	0,9024	0,8758	0,8624

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 8 – Comparação das Curvas de Absorbância com e sem Filtros



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As três curvas de absorbância indicam que apresentou comportamento linear consistente entre concentração e absorbância para ambos os cenários, mostrando que o uso do filtro não provocou alterações significativas nos valores de absorbância, sem a retenção do corante.

Ademais, foi realizado a leitura das amostras descarte após 96h de tratamento, no qual foi coletado amostras sem o uso do filtro de F0.45 - PES KASVI 0,45 μm e F0.20 - PTFE 0,20 μm . Segue a tabela 11 com os dados computados:

Tabela 11 – Comprimentos de onda e absorbâncias dos corantes analisados

Filtro	Concentração	Absorbância
S/Filtro	0,05	0,3684
F0.20	0,05	0,3549
F0.45	0,05	0,3589

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao comparar os dados da tabela 11, das leituras referentes às amostras após 96h de tratamento, reforçamos que as absorbâncias obtidas com e sem filtração, permaneceram muito próximas entre si, demonstrando que o uso dos filtros não alterou de maneira significativa a quantificação do corante e, portanto, não comprometeu a análise espectrofotométrica.

Portanto, para este estudo, o filtro escolhido por questões de eficiência na quantidade de reuso, aspectos econômicos e confiabilidade técnica durante os

testes realizados, foi o filtro membrana PES KASVI 0,45 μm , o qual foi utilizado nos demais preparos das amostras, auxiliando na obtenção de uma amostra mais “limpa” sem biochar misturado.

5.4 Avaliação do desempenho dos biochars modificado com ferro

Foram obtidos biochars por meio de três diferentes agentes de magnetização, os quais foram submetidos a um teste visual para identificar a propriedade magnética dos materiais por meio de um ímã de alta intensidade. Abaixo segue as figuras de 9 a 11, que demonstram a eficiência em questão:

Figura 9 – Teste visual de magnetização Biochar LVP



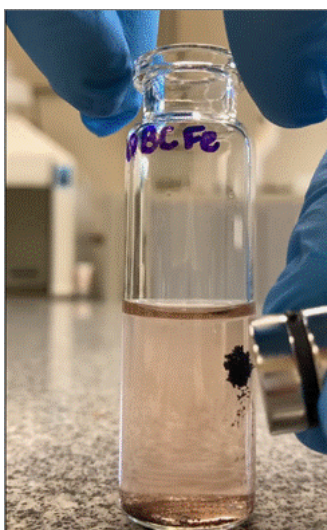
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 10 – Teste visual de magnetização Biochar LV-CBA



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 11 – Teste visual de magnetização Biochar FeCl_3



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Resultando em maior magnitude em primeiro lugar o biochar de Lama vermelha do Pará, em segundo lugar o biochar de FeCl_3 e terceiro lugar com zero eficiência o biochar de LV-CBA.

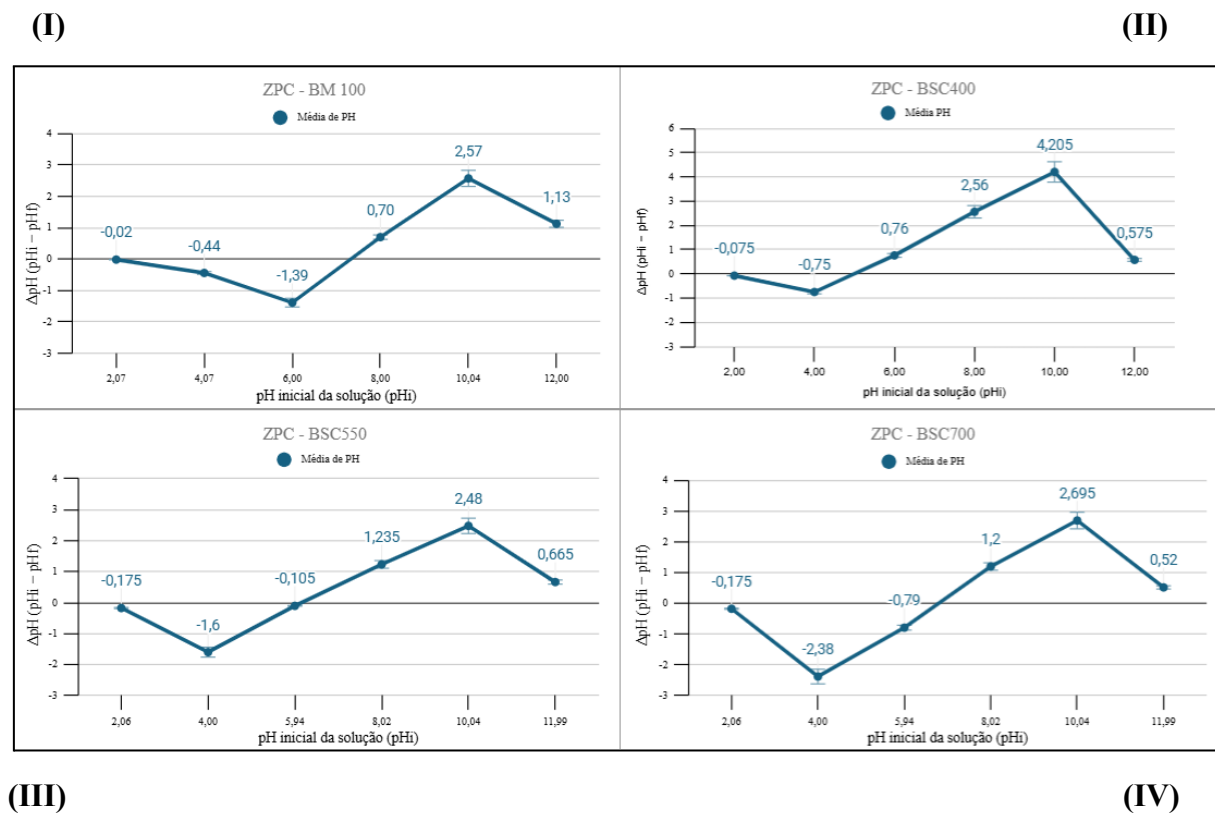
5.5 Resultados Experimentais de PH de carga zero

O experimento de ponto de carga zero (pHpzc) determinado para diferentes biochars, teve o objetivo de compreender como a modificação das superfícies influenciou nas propriedades de adsorção. Segundo Mustafa, Bulduk e Erten (2024), o pHpzc foi determinado devido a variação do pH (ΔpH) no qual a carga líquida superficial se aproxima de zero, obtido pelo cruzamento da curva experimental com o eixo de ajuste ou, quando esse ponto não foi observado experimentalmente, utiliza a interpolação entre os pontos mais próximos. Os autores descrevem baseado na literatura, que valores de pH inferiores ao pHpzc promovem a protonação (adição de um próton H^+ a um átomo) da superfície com carga positiva, viabilizando a adsorção de espécies aniônicas no qual possuem carga elétrica negativa. Enquanto valores de pH superiores ao pHpzc levam à desprotonação (remoção de um próton H^+), resultando em uma superfície com carga negativa, favorável à adsorção de cátions que possuem íons com carga positiva.

Dessa forma, a caracterização constitui uma ferramenta fundamental para a interpretação do comportamento de adsorção em meios aquosos e para a definição das condições experimentais mais adequadas em estudos de remoção de contaminantes.

A fim de facilitar a análise das amostras, foram organizadas em grupos, os quais correspondem a essa distribuição a seguir: 1º Grupo: Biomassa (BM) exposta a 100°C, Biochar (BSC) pirolisado a 400°C, Biochar (BSC) pirolisado a 550°C e Biochar (BSC) pirolisado a 700°C.

Figura 12 - Apresenta os valores obtidos para os materiais do Grupo 1



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Observando o gráfico (I) é possível perceber que no início as amostras se aproximam do zero, porém se situa-se em torno do ponto -1,39 e 0,70 representando estabilidade próximo ao pH 7, que contém uma superfície neutra.

No gráfico (II), observou-se um cruzamento entre a interpolação e a linha de ajuste entre o ponto -0,75 e 0,76, com grandes intensidades localizadas no gráfico, caracterizam um material instável com condições químicas básicas, onde a faixa ideal de aplicação se concentra no pH 5.

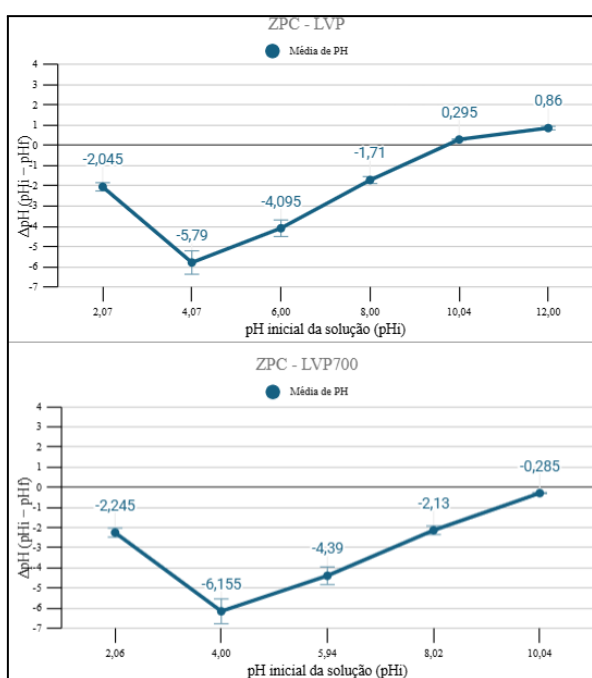
Análise do gráfico (III) demonstra um crescimento gradual, no qual possui maior estabilidade, indicando melhor equilíbrio entre grupos funcionais ácidos e básicos. Sua estabilidade se encontra entre o ponto -0,105 e 1,235 identificado aproximadamente pH 6,2, correspondente ao ponto em que $\Delta pH = 0$.

Já no gráfico (IV) indica valores próximos de zero no ponto -0,79 e 1,2 e uma elevação até o ponto 2,70 junto a uma área reativa. Proporcionando a faixa ideal de aplicação próximo ao pH 6, favorecendo uma adsorção mais rápida e eficiente, devido valor associado ao equilíbrio entre cargas positivas e negativas da superfície.

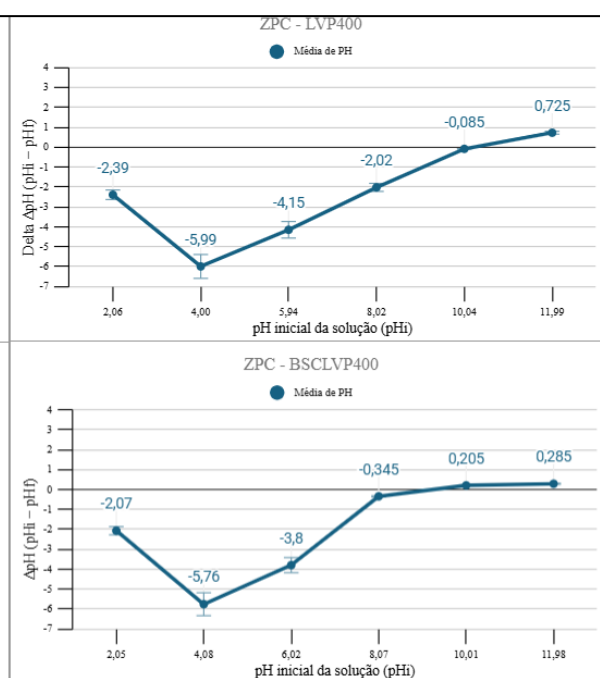
2º Grupo: Lama vermelha do Pará (LVP), Lama vermelha do Pará pirolisado a 400°C (LVP400), Lama vermelha do Pará pirolisado a 700°C (LVP700), Biochar de Lama vermelha do Pará pirolisado a 400°C (BSCLVP400) e Biochar de Lama vermelha do Pará pirolisado a 700°C (BSCLVP700).

Figura 13 - Apresenta os valores obtidos para os materiais do Grupo 2

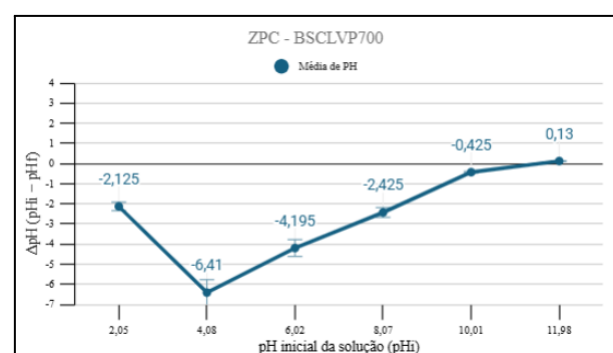
(V)



(VI)



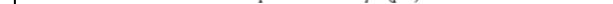
(VII)



(VIII)



(IX)



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O comportamento do gráfico (V) demonstra uma queda intensa no segundo ponto, seguida por uma recuperação gradual da estabilidade, na qual o sistema se aproxima de $\Delta\text{pH} = 0$ entre o ponto -1,71 a 0,86, que representa a faixa de pH entre 9. Segundo Méndez et al. (2022), devido a essa tendência, foram analisadas a presença de hidróxidos metálicos e óxidos, resultando em uma superfície quimicamente ativa, com caráter fortemente ácido, porém instável em condições iniciais.

De acordo com os gráficos (VI) e (VII), observa-se uma semelhança comportamental direta com a amostra LVP, uma vez que todos os gráficos que envolvem esse material apresentam curvas com perfil em “V”. Esse comportamento indica que os materiais exibem um comportamento ácido-base típico, evidenciando a presença de um ponto de equilíbrio de cargas bem definido, associado ao ponto de carga zero, portanto os resultados descritos para a amostra interpretam que o tratamento térmico realizado não altera drasticamente a química superficial. Registrando um pH médio de equilíbrio próximos de pH 9 a 10.

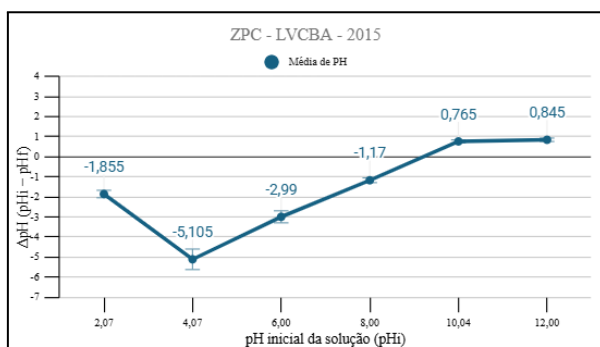
A partir do gráfico (VIII), nota-se que a queda inicial é menos intensa e a recuperação é mais rápida com estabilização do ponto em -0,35 e 0,28, registrando uma média de pH 6, obtendo um controle do equilíbrio e uma adsorção eficaz.

No gráfico (IX), observou-se inicialmente uma queda intensa com uma recuperação lenta, comprovando menor instabilidade e dificuldade de modificação. Os valores de cruzamento foram -0,79 e 1,20 sendo estimado aproximadamente pH estável em 10,9.

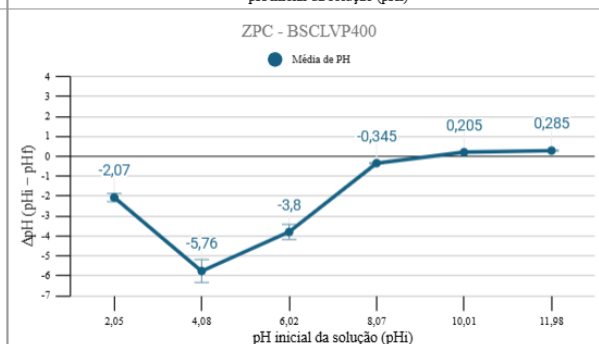
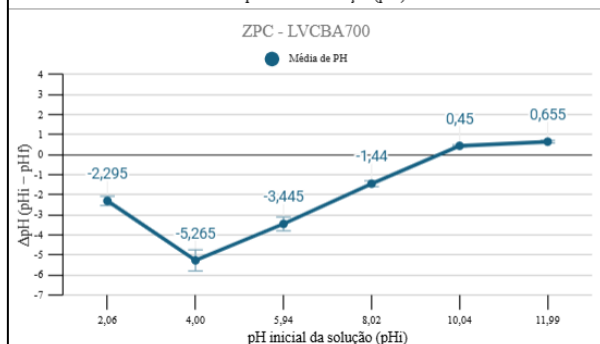
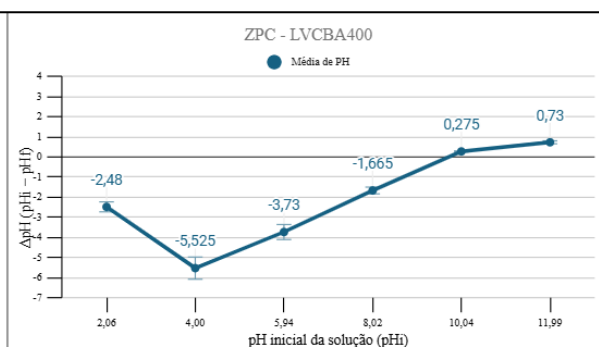
3ºGrupo: Lama vermelha da empresa CBA (LVCBA), Lama vermelha da empresa CBA pirolisado a 400°C (LVCBA400), Lama vermelha da empresa CBA pirolisado a 700°C (LVCBA700), Biochar Lama vermelha da empresa CBA pirolisado a 400°C (BSCLVCBA400) e Biochar de Lama vermelha da empresa CBA pirolisado a 700°C (BSCLVCBA700).

Figura 14 - Apresenta os valores obtidos para os materiais do Grupo 3

(X)

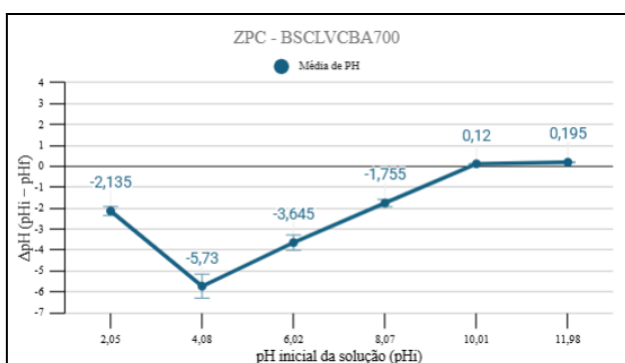


(XI)



(XII)

(XIII)



(XVI)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os dados dos materiais modificados com LVCBA, revelam uma curva em formato de V, comum em materiais adsorventes ácidos, como demonstrado nos resultados anteriores com os materiais compostos por LVP, contudo neste cenário temos o menor registro desta declividade. O gráfico (X), possui estabilidade no intervalo de -1,17 e 0,84 representando pH 9, predominantemente demonstrando uma superfície ácida.

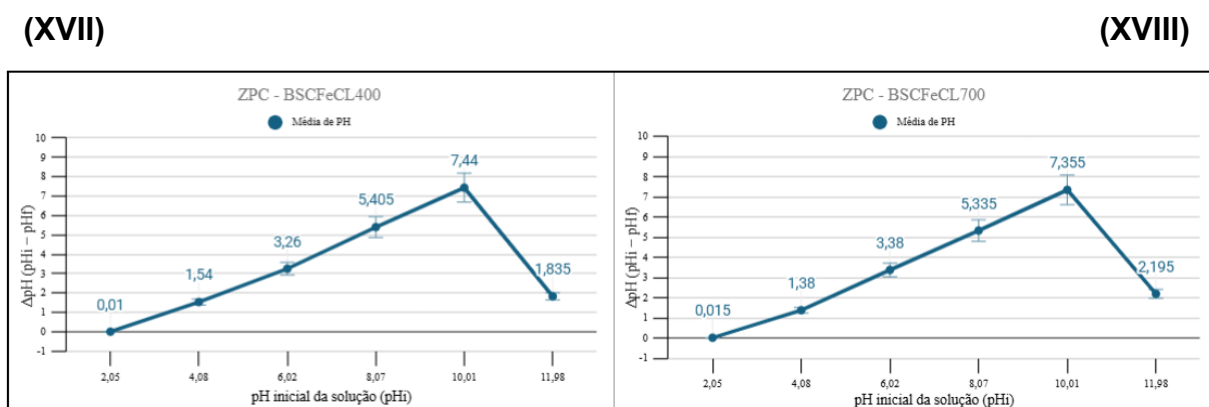
O comportamento observado no gráfico (XI e XII) evidencia que o material LVCBA400 LVCBA700 possuem perfis similares ao LVCBA bruto, porém com resposta mais intensa. A partir, do tratamento térmico obtemos que no gráfico (XI) permanece com a superfície ácida, porém mais reativa, com a faixa ideal de

aplicação no ponto -1,665 a 0,275, correspondente ao pH 9. Por sua vez, o perfil (XII) observado revela que passou por um tratamento severo, promovendo uma adsorção rápida dos reagentes, sua estabilidade em torno do ponto -1,44 e 0,45 com um pH estimado em pH 9.

A visualização dos dados (XIII e XVI) indica o pH_{zc} baixo, mais próximos da neutralidade obtendo uma superfície equilibrada. O BSCLVCBA400 demonstrou estabilização no ponto de -0,28 a 0,36 em pH 9,4. Já o BSCLVCBA700 apresenta constância na faixa de 0,12 e 0,19, correspondendo a região do pH 9,7.

4º Grupo: Biochar com $FeCl_3$ pirolisado a 400°C (BSCFeCL400) e Biochar com $FeCl_3$ pirolisado a 700°C (BSCFeCL700).

Figura 15 - Apresenta os valores obtidos para os materiais do Grupo 4



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A representação gráfica (XVII e XVIII) modificados com $FeCl_3$, obtiveram uma estrutura similar em relação ao formato da curva de tendência geral, em que mostra uma crescente do PH atingindo um grande pico, e posteriormente uma queda no último ponto. Em nenhum trecho ocorre cruzamento claro da curva média de pH com a linha de ajuste, porém a distância entre a curva experimental e o ajuste revela forte variação de ΔpH ao longo do gráfico, não se estabilizando em nenhum ponto da faixa de pH avaliado. Tornando ambos com reatividade superficial elevada (pequenas mudanças no pH causam grandes mudanças na carga da superfície) e ácidos, promovendo uma adsorção eficiente (removendo contaminantes rapidamente).

Embora o ponto de carga zero não tenha sido atingido, os materiais apresentam uma faixa de estabilidade operacional em pH próximo de 2, na qual a

variação de pH se torna menos acentuada. Nessa condição, a superfície modificada com FeCl_3 tende a permanecer carregada positivamente por mais tempo, o que favorece a atração eletrostática com corantes aniônicos presentes na solução, visando a maior eficiência de remoção observada nos ensaios de adsorção realizados com esse material.

De modo geral, a comparação entre os diferentes biochars mostra que a modificação com FeCl_3 e tratados a 400 °C / 700 °C apresentou o melhor desempenho, combinando elevada capacidade de adsorção de corantes, ampliando sua faixa de estabilidade superficial em condições de pH próximas à neutralidade, tornando-se mais adequado para aplicações práticas em tratamento de efluentes reais.

Segue uma tabela de consolidação geral dos gráficos apresentados:

Tabela 12 – Dados experimentais e curva de calibração das absorbâncias

Grupo	Material	Temperatura (°C)	pH _{pzc} aproximado	Classificação
1	BM 100°C	100	~7,2	Neutro
	BSC400	400	~6,1	Levemente ácido
	BSC550	550	~6,2	Levemente ácido
	BSC700	700	~6,8	Levemente básico
2	LVP	—	~9,4	Básico
	LVP400	400	~10,3	Fortemente básico
	LVP700	700	~9,8	Básico
	BSCLVP400	400	~9,1	Básico
	BSCLVP700	700	~10,9	Muito básico
3	LVCBA	—	~9,1	Básico
	LVCBA400	400	~9,5	Básico
	LVCBA700	700	~9,4	Básico
	BSCLVCBA400	400	~9,4	Básico
	BSCLVCBA700	700	~9,7	Básico
4	BSCFeCl400	400	~2,0	Fortemente ácido
	BSCFeCl700	700	~2,0	Fortemente ácido

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

5.6 Resultados da adsorção dos corantes em meio pH 3

Para os ensaios de adsorção, foram selecionados os biochars com melhor desempenho nos testes de pH de carga zero (pH_{pzc}), sendo eles o BSCFeCl₃ obtido a 400 °C e 700 °C. Os experimentos foram realizados em triplicata, totalizando 42 frascos, considerando sete corantes distintos e dois materiais adsorventes.

Em frascos de Becker com capacidade de 100 mL, adicionaram-se 10 mL de água deionizada previamente ajustada para pH 3, seguidos da adição de 1 mL da

solução de corante, de modo a obter uma concentração final de 0,1 g/L, e 0,02 g de biochar empregado como material adsorvente. Em seguida, os frascos foram submetidos à agitação em mesa agitadora a 175 rpm, por um período de 24 horas, à temperatura ambiente.

Após o encerramento da agitação, todas as amostras foram filtradas utilizando filtro de 0,45 µm e, na sequência, analisadas em espectrofotômetro UV-Vis, a fim de determinar os valores de absorbância. Além disso, o pH final das soluções foi medido com auxílio de um pHmetro, para verificar possíveis alterações após o contato do adsorvente durante as 24 horas de reação.

5.6.1 Determinação da concentração dos corantes

Computando os dados, foi construída uma tabela de resultados na qual as curvas de calibração, previamente determinadas para cada corante, foram utilizadas para o cálculo das concentrações finais (mg/L).

Para o corante C1, a concentração foi determinada a partir da equação da reta obtida pela curva de calibração.

$$\text{Abs} = 9,33 \cdot X + (-0,00089) \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

Abs = corresponde à absorbância medida;

a = 9,33 é o coeficiente angular;

b = -0,00089 é o coeficiente linear;

X representa a concentração do corante (mg/L).

Considerando que a absorbância é conhecida, a equação foi rearranjada para o cálculo da concentração, incluindo o fator de diluição utilizado, conforme a Equação:

$$X = ((\text{Abs} - b) / a) \times \text{diluição} \quad (\text{Eq. 2})$$

5.6.2 Cálculo da eficiência de remoção

A eficiência de remoção dos corantes foi determinada com base na diferença entre a concentração inicial da solução bruta e a concentração final após o tratamento com o biochar, dividido pela concentração inicial, conforme a Equação 3:

$$\text{Remoção (\%)} = [(C_i - C_f) / C_i] \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:

C_i é a concentração inicial do corante (mg/L);

C_f é a concentração final após o processo de adsorção (mg/L).

Posteriormente, foram calculados a média e o desvio padrão dos valores de remoção (%) obtidos nas triplicatas, para cada corante e para cada tratamento térmico do biochar, permitindo a comparação do desempenho adsorvente entre os materiais avaliados.

Tabela 13 – Dados referentes a cálculos remoção corante C1

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C1	-	-	0,8526	0,091				1
C1	400	R1	0,47	0,050	45,1	27,49	10	1
C1	400	R2	0,62	0,066	27,5			1
C1	400	R3	0,6219	0,067	27,0			1
C1	700	R1	0,2072	0,022	75,6	65,68	11	1
C1	700	R2	0,3985	0,043	53,2			1
C1	700	R3	0,292	0,031	65,7			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 14 – Dados referentes a cálculos remoção corante C2

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C2	-	-	0,6475	0,073				2
C2	400	R1	0,5035	0,057	22	17	5	2
C2	400	R2	0,5712	0,065	12			2
C2	400	R3	0,5359	0,061	17			2
C2	700	R1	0,53	0,030	59	46,69	7	1
C2	700	R2	0,6956	0,039	46			1
C2	700	R3	0,691	0,039	47			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 15 – Dados referentes a cálculos remoção corante C3

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C3	-	-	0,3729	0,058				2
C3	400	R1	0,5076	0,039	32	13	13	1
C3	400	R2	0,6504	0,050	13			1
C3	400	R3	0,6969	0,054	7			1
C3	700	R1	0,1121	0,009	85	74,40	7	1
C3	700	R2	0,22	0,017	70			1
C3	700	R3	0,1901	0,015	74			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 16 – Dados referentes a cálculos remoção corante C4

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C4	-	-	0,5757	0,062				2
C4	400	R1	0,4712	0,051	18	15	2	2
C4	400	R2	0,4945	0,053	14			2
C4	400	R3	0,4912	0,053	15			2
C4	700	R1	0,935	0,050	19	29,40	10	1
C4	700	R2	0,3457	0,037	40			2
C4	700	R3	0,406	0,044	29			2

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 17 – Dados referentes a cálculos remoção corante C5

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C5	-	-	1,0044	0,063				2
C5	400	R1	0,8369	0,052	17	10	6	2
C5	400	R2	0,9079	0,057	10			2
C5	400	R3	0,9595	0,060	5			2
C5	700	R1	0,709	0,044	30	25,60	4	2
C5	700	R2	0,7556	0,047	26			2
C5	700	R3	0,7945	0,049	22			2

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 18 – Dados referentes a cálculos remoção corante C6

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C6	-	-	0,5957	0,055				2
C6	400	R1	0,8332	0,039	29	29	2	1
C6	400	R2	0,8702	0,041	26			1
C6	400	R3	0,8403	0,039	29			1
C6	700	R1	0,5527	0,025	54	47,60	4	1
C6	700	R2	0,6234	0,029	48			1
C6	700	R3	0,631	0,029	47			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 19 – Dados referentes a cálculos remoção corante C7

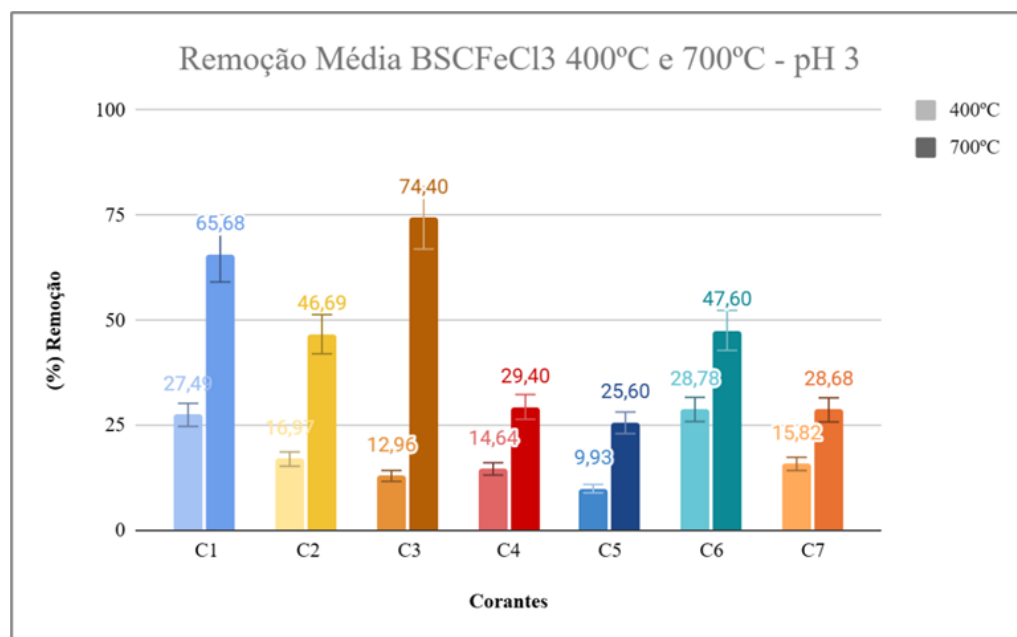
Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorvância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C7	-	-	1,0239	0,073				2
C7	400	R1	0,832	0,059	19	16	3	2
C7	400	R2	0,8639	0,061	16			2
C7	400	R3	0,8886	0,063	13			2
C7	700	R1	0,722	0,051	30	28,68	3	2
C7	700	R2	0,7795	0,055	24			2
C7	700	R3	0,7339	0,052	29			2

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 20 – Consolidado remoção corantes

Temperatura Tratamento	Remoção Média - C1	Remoção Média - C2	Remoção Média - C3	Remoção Média - C4	Remoção Média - C5	Remoção Média - C6	Remoção Média - C7
400°C	27,49	17	13	15	10	29	16
700°C	65,68	46,69	74,40	29,40	25,60	47,60	28,68

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 16 – Remoção do biochar FeCl₃ – pH3

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A eficiência de remoção dos sete corantes em meio ácido (pH 3), empregando o BSCFeCl₃ produzido a 400 °C e 700 °C está apresentado na figura 16, no qual relata o percentual de retenção do contaminante por adsorção.

Os resultados obtidos para o material pirolisado a 700 °C indicaram valores superiores de retenção para todos os corantes avaliados. Destacaram-se, em ordem decrescente de eficiência, os corantes C3 (74,40%), C1 (65,68%) e C6 (47,60%),

enquanto os demais corantes apresentaram percentuais de remoção intermediários. Já para o adsorvente preparado a 400 °C, apresentaram valores inferiores de remoção, não excedendo 30% para nenhum dos corantes estudados.

A distinção de desempenho entre os materiais decorre das alterações estruturais descritas na literatura, evidenciando que as pirólise de maior temperatura, favorecem a interação adsorvente com a área de análise. A baixa dispersão dos dados nas análises em triplicata indica adequada robustez experimental.

5.7 Resultados da adsorção dos corantes em meio pH 10

Tabela 21 – Dados referentes a cálculos remoção corante C1

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C1	-	-	0,7498	0,080				1
C1	400	R1	0,14	0,015	81,8	83,84	4	1
C1	400	R2	0,08	0,009	89,2			1
C1	400	R3	0,1204	0,013	83,8			1
C1	700	R1	0,2123	0,023	71,6	70,22	3	1
C1	700	R2	0,2552	0,027	65,9			1
C1	700	R3	0,2227	0,024	70,2			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 22 – Dados referentes a cálculos remoção corante C2

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C2	-	-	0,751	0,085				2
C2	400	R1	0,624	0,035	58	57	3	1
C2	400	R2	0,7029	0,040	53			1
C2	400	R3	0,6517	0,037	57			1
C2	700	R1	0,4896	0,028	67	67	2	1
C2	700	R2	0,4552	0,026	69			1
C2	700	R3	0,5168	0,029	65			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 23 – Dados referentes a cálculos remoção corante C3

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C3	-	-	0,5282	0,082				2
C3	400	R1	0,0256	0,002	97	98	1	1
C3	400	R2	0,0162	0,001	98			1
C3	400	R3	0,014	0,001	99			1
C3	700	R1	0,0792	0,006	92	91,75	2	1
C3	700	R2	0,0858	0,007	92			1
C3	700	R3	0,1107	0,009	89			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 24 – Dados referentes a cálculos remoção corante C4

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C4	-	-	0,7661	0,082				2
C4	400	R1	0,8879	0,048	42	42	3	1
C4	400	R2	0,9582	0,051	37			1
C4	400	R3	0,8839	0,047	42			1
C4	700	R1	0,9858	0,053	36	35,14	2	1
C4	700	R2	0,5262	0,056	31			2
C4	700	R3	0,9943	0,053	35			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 25 – Dados referentes a cálculos remoção corante C5

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C5	-	-	0,7608	0,095				4
C5	400	R1	0,3249	0,038	60	55	8	4
C5	400	R2	0,4394	0,053	44			4
C5	400	R3	0,3606	0,043	55			4
C5	700	R1	0,477	0,058	39	36,93	2	4
C5	700	R2	0,5022	0,061	36			4
C5	700	R3	0,4919	0,060	37			4

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 26 – Dados referentes a cálculos remoção corante C6

Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C6	-	-	0,3576	0,064				4
C6	400	R1	0,4919	0,023	65	66	1	1
C6	400	R2	0,4807	0,022	66			1
C6	400	R3	0,4704	0,021	67			1
C6	700	R1	0,5899	0,027	58	57,83	0	1
C6	700	R2	0,6001	0,028	57			1
C6	700	R3	0,5899	0,027	58			1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 27 – Dados referentes a cálculos remoção corante C7

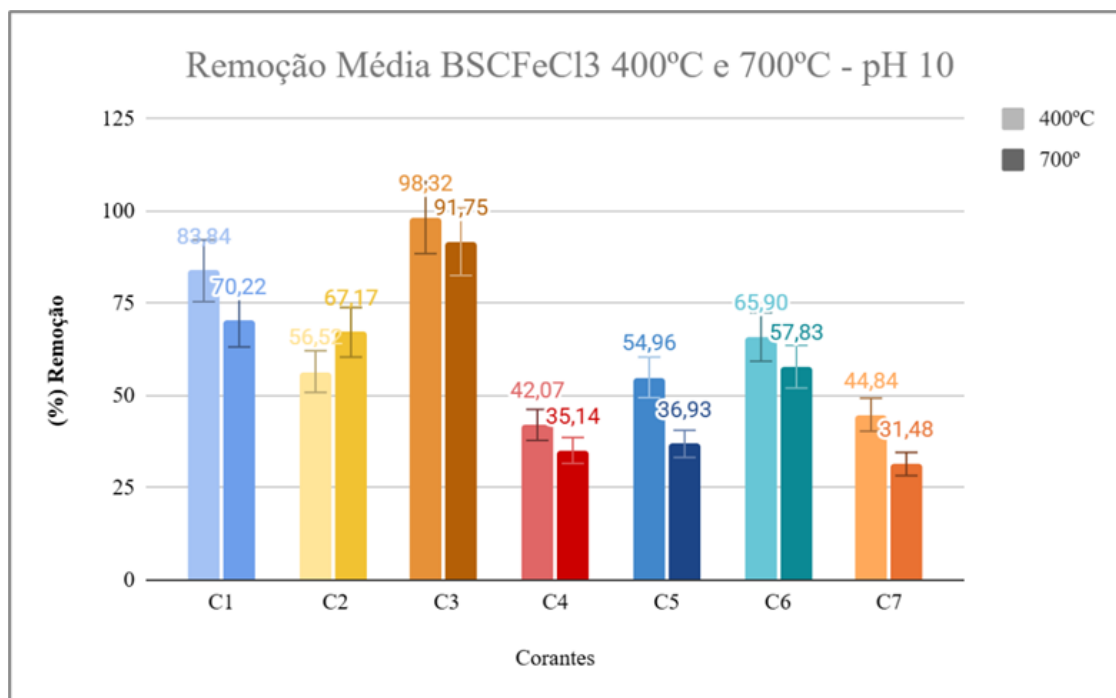
Corante	Temperatura	Replicata	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	REMOÇÃO (%)	Remoção média	Desvio Padrão	Diluição
C7	-	-	0,6309	0,089				4
C7	400	R1	0,3231	0,045	50	45	4	4
C7	400	R2	0,3756	0,052	41			4
C7	400	R3	0,3537	0,049	45			4
C7	700	R1	0,436	0,061	32	31,48	0	4
C7	700	R2	0,4393	0,062	31			4
C7	700	R3	0,4363	0,061	31			4

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 28 – Consolidado remoção dos corantes

Temperatura Tratamento	Remoção Média - C1	Remoção Média - C2	Remoção Média - C3	Remoção Média - C4	Remoção Média - C5	Remoção Média - C6	Remoção Média - C7
400°C	83,84	57	98	42	55	66	45
700°C	70,22	67	91,75	35,14	36,93	57,83	31,48

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 17 – Remoção do biochar FeCl₃ – pH10

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O mesmo teste experimental foi realizado em meio básico (pH 10), mantendo-se as demais condições constantes. Os dados estão ilustrados na figura 17.

Para o material preparado a 400 °C, verificaram-se, os maiores percentuais de remoção para os corantes C3, C1 e C6, com percentuais de remoção de 98,32%, 83,84% e 65,90%, respectivamente, enquanto os demais corantes exibiram desempenho intermediário.

Em contrapartida, o biochar pirolisado a 700 °C, apesar de apresentar valores expressivos para alguns corantes, especialmente C3 (91,75%), C1 (70,22%) e C6 (57,83%), não superou o desempenho para o material pirolisado a menor temperatura.

Ao comparar os ensaios realizados com pH 3 e pH 10, nota-se uma inversão no comportamento adsorvente do BSCFeCl₃. Enquanto em meio ácido o material pirolisado a 700 °C apresentou desempenho superior para todos os corantes avaliados, em meio alcalino o biochar produzido a 400 °C mostrou-se mais eficiente na maior parte dos sistemas.

Essa resposta reforça a influência conjunta do pH da solução e da temperatura de pirólise sobre os mecanismos de adsorção.

5.8 Resultados Experimentais de adsorção para o corante C1 - pH 10 por 24h

O experimento de adsorção do corante C1, obteve suas especificações estratificadas de acordo com os resultados anteriores, onde demonstram maior desempenho e estruturas estáveis. Conduzido em meio ao pH 10, com BSCFeCL de 400°C e 700°C com aplicações de 0,5g, 1,0g e 1,5g, por diferentes tempos de contato em que permitiu acompanhar a variação da absorbância da solução ao longo do tempo e dosagem de massa.

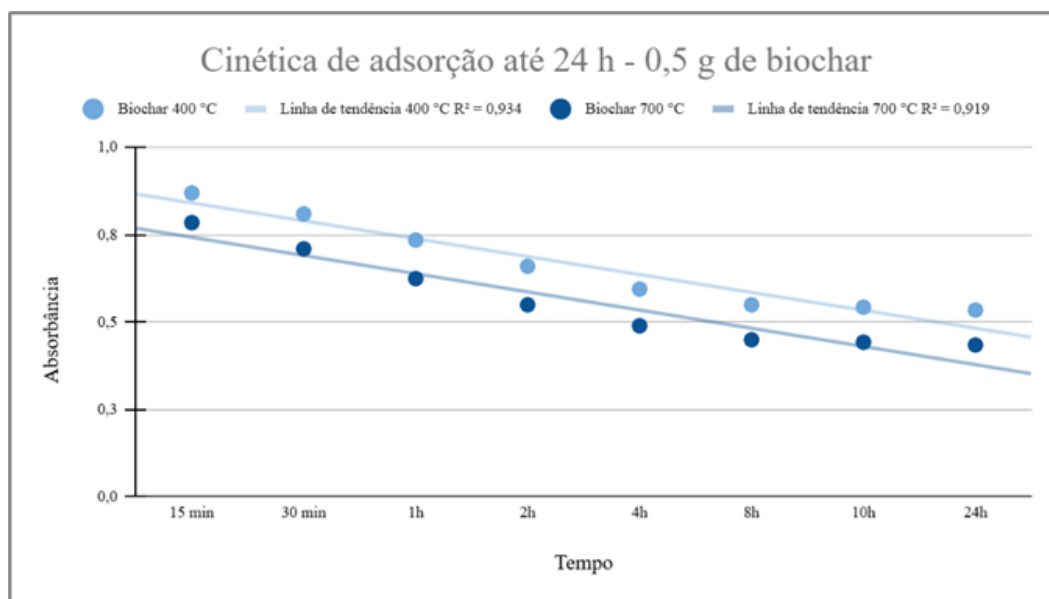
A Tabela 26 a X e na figura 18 a X, apresenta os dados obtidos para a cinética de adsorção dos biochars 400/700° C com massa de 0,5g.

Tabela 29 – Dados da cinética de adsorção até 24 h (0,5 g de biochar)

Tempo	Biochar 400 °C	Biochar 700 °C
15 min	0,869	0,784
30 min	0,809	0,709
1h	0,734	0,624
2h	0,659	0,549
4h	0,594	0,489
8h	0,549	0,449
10h	0,542	0,442
24h	0,534	0,434

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 18 – Cinética de adsorção até 24 h (0,5 g de biochar)



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

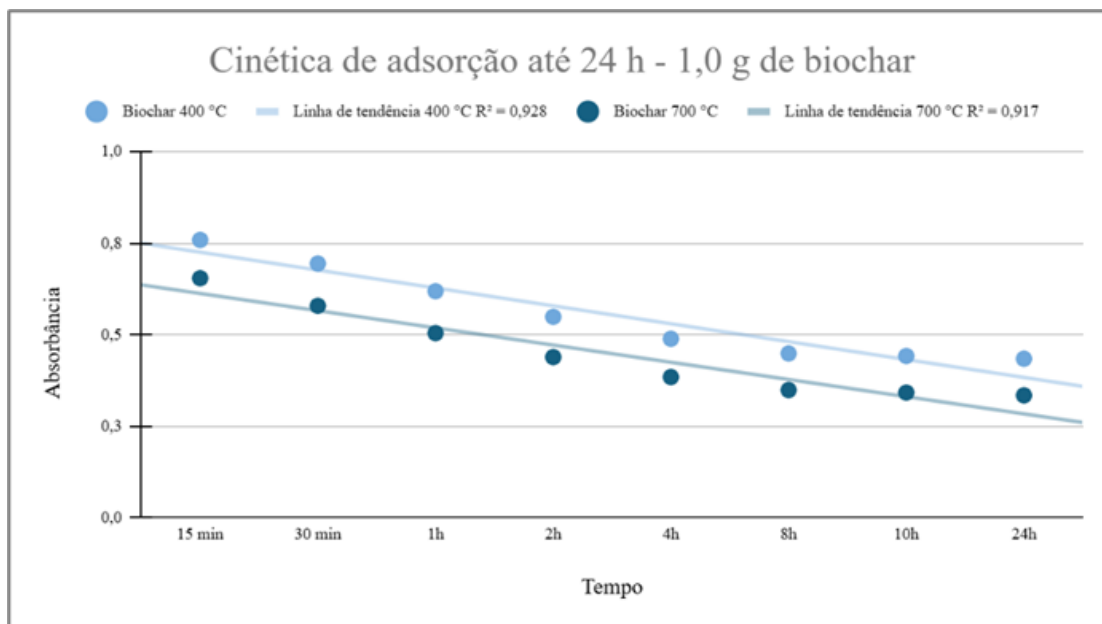
Os dados ilustram a tendência de absorção, ao qual se aproxima do equilíbrio próximo às 8 horas de contato. Não observado grandes diferenças em relação à pirólise aplicada, ambos foram similares e resultaram em uma redução na absorbância entre 1h e 2h de contato. Indicando que, embora a maior temperatura de pirólise resulte em desempenho ligeiramente superior, a diferença entre as médias foi moderada, demonstrando que em situações com baixa massa de adsorvente, o impacto da temperatura de pirólise é menor. As linhas de tendência apresentaram bons coeficientes de determinação com (R^2) de 0,934 e 0,919.

Tabela 30 – Dados da cinética de adsorção até 24 h (1,0 g de biochar)

Tempo	Biochar 400 °C	Biochar 700 °C
15 min	0,759	0,654
30 min	0,694	0,579
1h	0,619	0,504
2h	0,549	0,439
4h	0,489	0,384
8h	0,449	0,349
10h	0,442	0,342
24h	0,434	0,334

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 19 – Cinética de adsorção até 24 h (1,0 g de biochar)



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

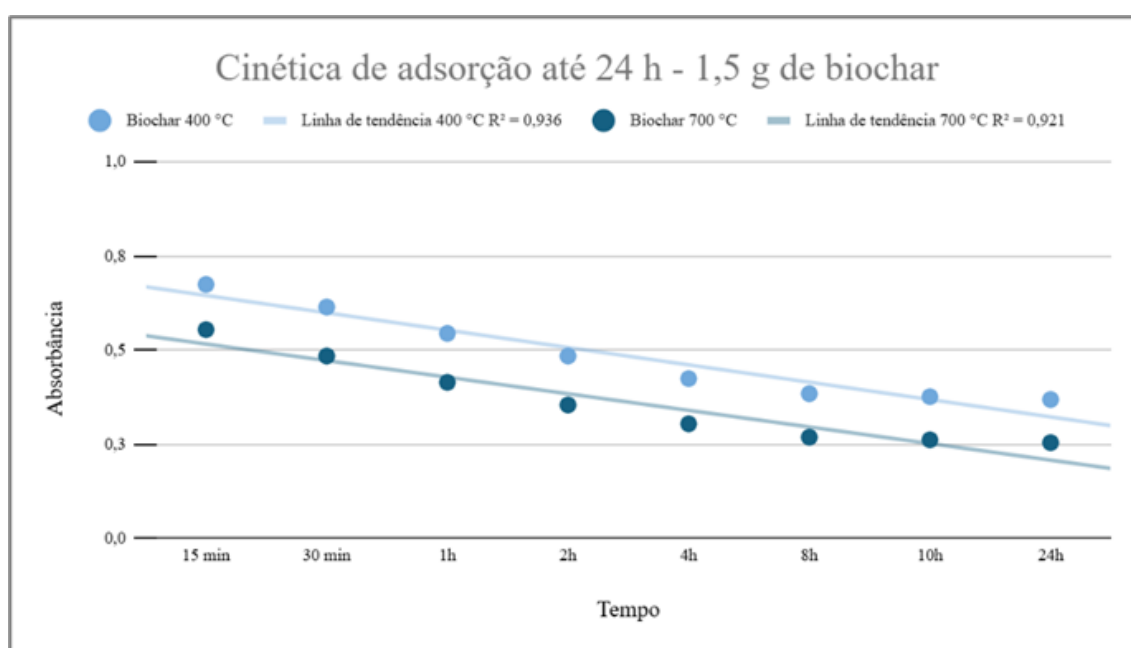
A partir da figura 19, foi analisada uma redução contínua da absorbância, indicando uma remoção progressiva do corante, aproximadamente no tempo de 1h ocorre uma queda acentuada, porém posteriormente o estado de equilíbrio está em 8h de contato. Entre 10h e 24h, as absorbâncias indicam fim do processo adsorptivo. Contudo, diferente dos dados anteriores, o desempenho do BSCFeCL 700°C, se destacou em todos os tempos avaliados. Promovendo menores absorbâncias em relação ao biochar de 400°, devido seu tempo maior de pirólise, o qual aumenta sua área superficial. As regressões apresentaram bom desempenho estatístico, evidenciado pelos coeficientes de determinação (R^2) de 0,928 e 0,917.

Tabela 31 – Dados da cinética de adsorção até 24 h (1,5 g de biochar)

Tempo	Biochar 400 °C	Biochar 700 °C
15 min	0,674	0,554
30 min	0,614	0,484
1h	0,544	0,414
2h	0,484	0,354
4h	0,424	0,304
8h	0,384	0,269
10h	0,376	0,262
24h	0,369	0,254

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 20 – Cinética de adsorção até 24 h (1,5 g de biochar)



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A figura 20, apresenta comportamento similar aos anteriores com similaridade nos pontos chaves de contato, no entanto pode-se concluir que o desempenho do BSCFeCL a 700°C foi superior com absorbâncias inferiores. Após 24 horas de contato, os valores de absorbância foram de 0,254 para o BSCFeCL a 700 °C e 0,369 para o BSCFeCL a 400 °C. Observou-se que as linhas de tendência exibiram

bons ajustes aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,936 e 0,921.

A partir desses dados experimentais, foram realizados os cálculos de concentração residual e percentual de remoção do corante, apresentados na Tabela 29, bem como o respectivo gráfico de eficiência de remoção, discutidos a seguir:

Tabela 32 – Cálculo da determinação de remoção BSCFeCL a 400 °C - 0,5g

Corante	Temperatura	Tempo	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	Remoção (%)	Diluição
C1	400°C	0h	1,000	0,107		1
C1	400°C	15 min	0,869	0,093	13	1
C1	400°C	30 min	0,809	0,087	19	1
C1	400°C	1h	0,734	0,079	27	1
C1	400°C	2h	0,659	0,071	34	1
C1	400°C	4h	0,594	0,064	41	1
C1	400°C	8h	0,549	0,059	45	1
C1	400°C	10h	0,542	0,058	46	1
C1	400°C	24h	0,534	0,057	47	1

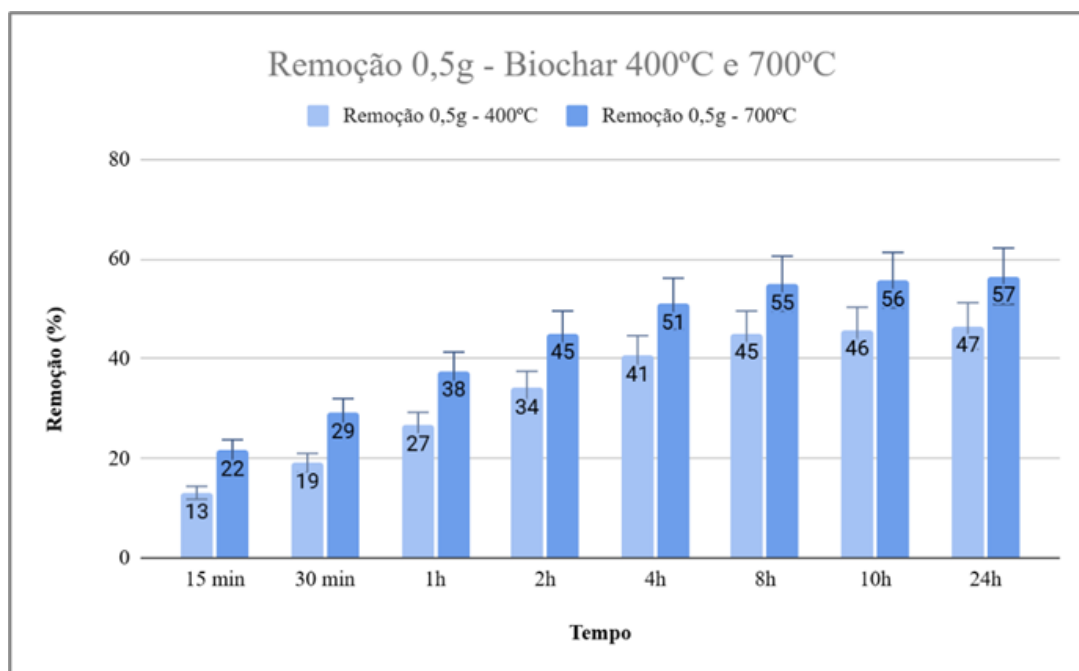
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 33 – Cálculo da determinação de remoção BSCFeCL a 700 °C - 0,5g

Corante	Temperatura	Tempo	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	Remoção (%)	Diluição
C1	700°C	0h	1,000	0,107		1
C1	700°C	15 min	0,784	0,084	22	1
C1	700°C	30 min	0,709	0,076	29	1
C1	700°C	1h	0,624	0,067	38	1
C1	700°C	2h	0,549	0,059	45	1
C1	700°C	4h	0,489	0,053	51	1
C1	700°C	8h	0,449	0,048	55	1
C1	700°C	10h	0,442	0,047	56	1
C1	700°C	24h	0,434	0,047	57	1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 21 – Remoção BSCFeCL a 400°C e 700 °C - 0,5g



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Para a menor dosagem avaliada (0,5 g), a remoção aumentou gradualmente com o tempo, onde o BSCFeCL a 400°C registrou 47% de remoção em 24h, com média em torno de 34%. Já o BSCFeCL a 700°C teve desempenho de 57% de remoção em 24h e uma média de 43%. Neste gráfico identificamos que a diferença de pirólise é mais relevante, resultando que a maior temperatura de pirólise desempenha de forma ligeiramente superior.

Tabela 34 – Cálculo da determinação de remoção BSCFeCL a 400 °C - 1,0g

Corante	Temperatura	Tempo	λ - absorvância	Concentração (mg/l)	Remoção (%)	Diluição
C1	400°C	0h	1,000	0,107		1
C1	400°C	15 min	0,759	0,081	24	1
C1	400°C	30 min	0,694	0,074	31	1
C1	400°C	1h	0,619	0,066	38	1
C1	400°C	2h	0,549	0,059	45	1
C1	400°C	4h	0,489	0,053	51	1
C1	400°C	8h	0,449	0,048	55	1
C1	400°C	10h	0,442	0,047	56	1
C1	400°C	24h	0,434	0,047	57	1

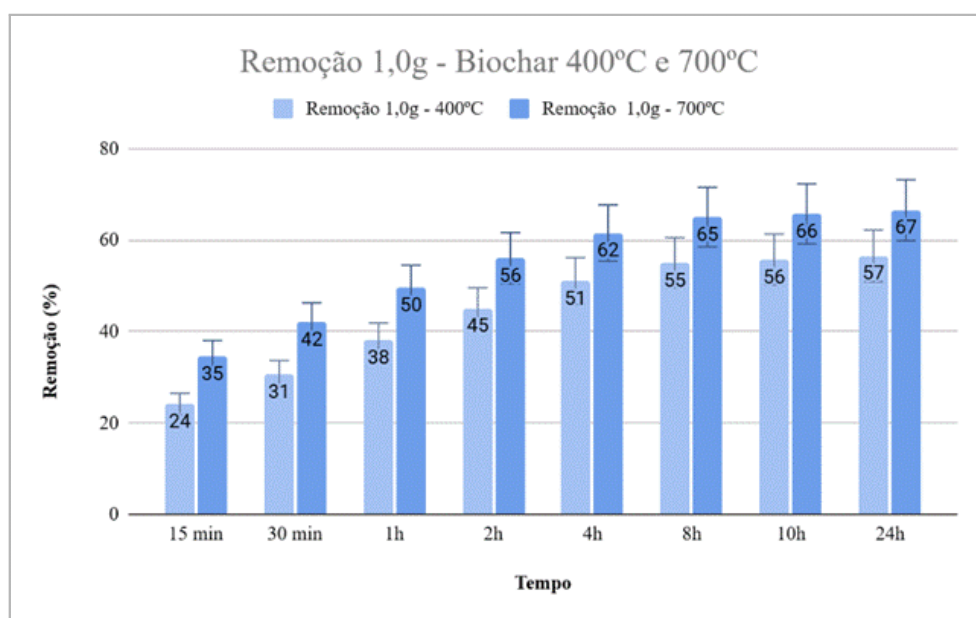
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 35 – Cálculo da determinação de remoção BSCFeCL a 700 °C - 1,0g

Corante	Temperatura	Tempo	λ - absorvância	Concentração (mg/l)	Remoção (%)	Diluição
C1	700°C	0h	1,000	0,107		1
C1	700°C	15 min	0,654	0,070	35	1
C1	700°C	30 min	0,579	0,062	42	1
C1	700°C	1h	0,504	0,054	50	1
C1	700°C	2h	0,439	0,047	56	1
C1	700°C	4h	0,384	0,041	62	1
C1	700°C	8h	0,349	0,038	65	1
C1	700°C	10h	0,342	0,037	66	1
C1	700°C	24h	0,334	0,036	67	1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 22 – Remoção BSCFeCL a 400°C e 700 °C - 1,0g



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

As medições registradas com massa de 1,0 g resultaram em elevação significativa da remoção em comparação à dosagem de 0,5 g, evidenciando o efeito positivo da maior disponibilidade de área superficial específica. O biochar pirolisado a 400 °C, as remoções atingiram 57% em 24 h, com média aproximada de 45%.

Em contraste, o biochar obtido a 700 °C apresentou desempenho superior, com remoções de 67% em 24 h e média em torno de 55%, além de tendência à estabilização após 8 h, indicando aproximação do equilíbrio adsorptivo. Esses resultados confirmam a cinética apresentada anteriormente.

Tabela 36 – Cálculo da determinação de remoção BSCFeCL a 400 °C - 1,5g

Corante	Temperatura	Tempo	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	Remoção (%)	Diluição
C1	400°C	0h	1,000	0,107		1
C1	400°C	15 min	0,674	0,072	33	1
C1	400°C	30 min	0,614	0,066	39	1
C1	400°C	1h	0,544	0,058	46	1
C1	400°C	2h	0,484	0,052	52	1
C1	400°C	4h	0,424	0,046	58	1
C1	400°C	8h	0,384	0,041	62	1
C1	400°C	10h	0,376	0,040	62	1
C1	400°C	24h	0,369	0,040	63	1

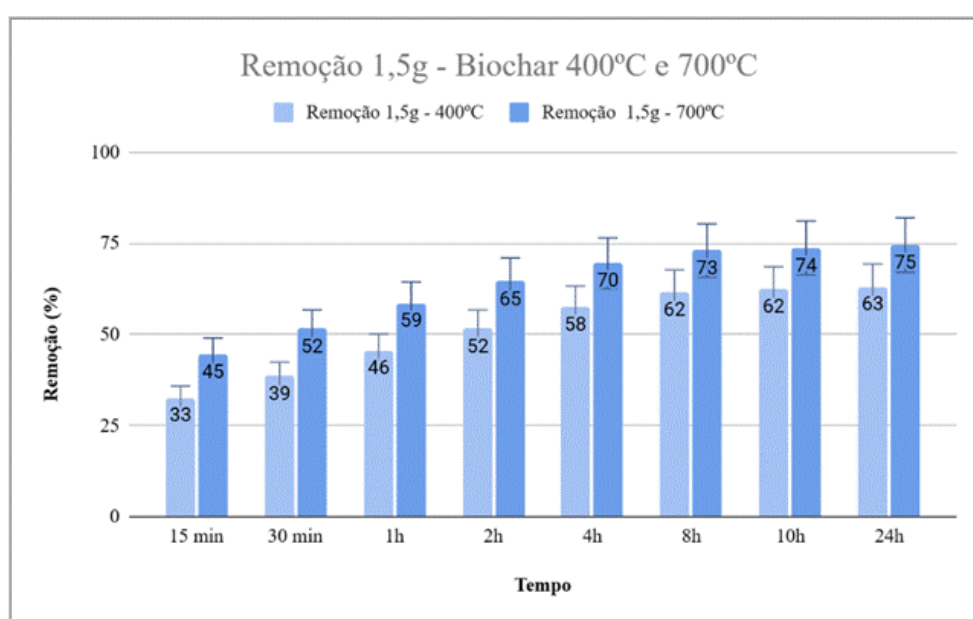
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 37 – Cálculo da determinação de remoção BSCFeCL a 700 °C - 1,5g

Corante	Temperatura	Tempo	λ - absorbância	Concentração (mg/l)	Remoção (%)	Diluição
C1	700°C	0h	1,000	0,107		1
C1	700°C	15 min	0,554	0,059	45	1
C1	700°C	30 min	0,484	0,052	52	1
C1	700°C	1h	0,414	0,044	59	1
C1	700°C	2h	0,354	0,038	65	1
C1	700°C	4h	0,304	0,033	70	1
C1	700°C	8h	0,269	0,029	73	1
C1	700°C	10h	0,262	0,028	74	1
C1	700°C	24h	0,254	0,027	75	1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 23 – Remoção BSCFeCL a 400°C e 700 °C - 1,5g



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

No maior teor de adsorvente avaliada (1,5 g), observaram-se os maiores índices de remoção entre todos os sistemas, visto que o biochar produzido a 400 °C resultou em valores mais elevados desde os tempos iniciais, em 24h sua remoção registrou 63% e média próxima de 52%, caracterizando melhora na eficiência final e no menor tempo de adsorção.

Por fim, os dados obtidos para o biochar a 700° evidenciam uma remoção de 75% em 24h, com uma média próxima de 64%, confirmando que a condição mais eficiente do experimento corresponde ao uso de 1,5 g de biochar pirolisado a 700 °C, com os maiores percentuais de remoção ao longo de todo o tempo de contato. Dessa forma, levando em conta um cenário operacional favorável em termos de eficiência e tempo de processo, foi considerado que a estabilização ocorre próximo aos tempos de 8h a 10h, registrando a remoção mais adequada para maximizar o resultado.

6 CONCLUSÃO

A pesquisa demonstrou que o biochar produzido a partir de resíduos agrícolas, em questão neste estudo o bagaço de cana-de-açúcar, apresenta elevada capacidade adsorvente para remoção de corantes industriais em meio aquoso. O processo de pirólise utilizado, especialmente nas temperaturas mais elevadas, permitiu a obtenção de um material com propriedades físicas adequadas para a captura de poluentes. Além disso, a modificação do biochar com materiais ferrosos adicionou propriedades magnéticas ao material, facilitando tanto o processo de adsorção quanto sua recuperação após o uso. Esse diferencial torna o biochar modificado com ferro uma alternativa competitiva ao carvão ativado comercial, com potencial de uso em larga escala, pois a possibilidade de reutilização do produto amplia ainda mais sua viabilidade prática e econômica. Diante disso, após as análises dos experimentos propostos no trabalho de conclusão de curso, o cenário mais promissor foi verificado no sistema que empregou o uso de BSCFeCL a 700°C com uso de massa do adsorvente elevado. Alcançando uma redução de variação nos percentuais de remoção, próximo ao tempo de contato de 8h, no qual representa uma eficiência uniforme. O desempenho de remoção do contaminante alcançou 75% ao final de 24h. Conclui-se que a aplicação do BSCFeCL a 700°C no tratamento de efluentes representa um avanço significativo para a gestão sustentável de resíduos e para o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo e alta eficiência no controle da poluição. A pesquisa contribui com o campo da química ambiental ao propor uma solução inovadora e alinhada aos princípios da economia circular, evidenciando o potencial do biochar como uma ferramenta de descontaminação eficaz e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

ABE, F. R. et al. Toxicological and behavioral responses as a tool to assess the effects of natural and synthetic dyes on zebrafish early life. *Chemosphere*, v. 178, p. 282–290, 2017.

AGÊNCIA BRASIL. Geração de lixo no mundo pode chegar a 3,8 bi de toneladas em 2050. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-02/geracao-de-lixo-no-mundo-pode-chegar-38-bi-de-toneladas-em-2050>. Acesso em: 17 out. 2024.

AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, v. 99, p. 19–33, 2014. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071.

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, 2022.

ANTUNES, M. L. P. et al. Estudo da utilização de serragem de madeira como adsorvente para tratamento de efluentes têxteis. *Revista de Estudos Ambientais*, v. 12, n. 2, p. 6–14, 2010.

BENJELLOUN, M. et al. Recent advances in adsorption kinetic models: Their application to dye types. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 14, n. 4, p. 103031, 2021.

CALCIOLARI, A. R. et al. Remoção do corante azul de metileno de solução aquosa usando biomassa de pele prata de café como bioadsorvente de baixo custo. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 3, 2022.

CEBRASSE. No Brasil, 33 milhões de toneladas de lixo ainda têm descarte irregular. Disponível em: <https://blog.cebrasse.org.br/2023/12/20/no-brasil-33-milhoes-de-toneladas-de-lixo-ainda-tem-descarte-irregular/>. Acesso em: 17 out. 2024.

CHENG, N. et al. Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review. *Environmental Pollution*, v. 273, p. 116448, 2021.

COSTA, D. M. A.; MELO, J. J. S. Estudo da capacidade de remoção de azul de metileno pela biomassa da casca do limão taiti (*Citrus latifolia*). *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 39, n. 3, p. 1123–1134, 2022.

COSTA DE JESUS, C. P. et al. Removal of reactive dye from aqueous solution using thermally treated red mud. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 10896–10906, 2021.

ÉRICA, J. et al. A indústria têxtil no Brasil: uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes. Disponível em: <https://conexaoagua.mpf.mp.br/arquivos/artigos-cientificos/2016/01-a-industria-textil-no-brasil-uma-revisao-dos-seus-impactos-ambientais-e-possiveis-tratamentos-para-os-seus-efluentes.pdf>

. Acesso em: 15 set. 2024.

GHANEAN, S.; GHANBAR AFJEH, M. Application of derivative spectrophotometry to determine the relation between color intensity and dye concentration of madder. *Dyes and Pigments*, v. 193, p. 109402, 2022.

INYANG, M. et al. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 22, p. 8868–8872, 2010.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: science, technology and implementation. 2. ed. London: Routledge, 2015.

LERMEN, A. M. et al. A utilização de resíduos agroindustriais para adsorção do corante azul de metileno: uma breve revisão. *Brazilian Applied Science Review*, v. 5, n. 1, p. 273–288, 2021.

MONTERO, J. I. Z. et al. High efficiency removal of As(III) from waters using a new and friendly adsorbent based on sugarcane bagasse and corncob husk Fe-coated biochars. *Science of the Total Environment*, v. 803, p. 150016, 2022.

MUSTAFA, B.; BULDUK, E.; ERTEN, E. Efficiency of dye adsorption of modified biochar: A comparison between chemical modification and ball milling assisted treatment. *Biomass and Bioenergy*, v. 185, p. 107247, 2024.

ONU BRASIL – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. O mundo precisa superar a era do desperdício e transformar o lixo em recurso. Disponível em:

<https://brasil.un.org/pt-br/261852-pnuma-o-mundo-precisa-superar-era-do-desperdicio-o-e-transformar-o-lixo-em-recurso>

. Acesso em: 17 out. 2024.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). Nature-based solutions: opportunities and challenges for scaling. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2022.

ROSITA, Y.; YULIANSYAH, A. T.; CAHYONO, R. B. The kinetic study of methylene blue adsorption using the red fruit waste biochar. *Konversi*, v. 11, n. 1, p. 19–25, 2022.

SALAS, A. P. S. Reaproveitamento de bagaço de cana de açúcar para a remoção de mercúrio em soluções aquosas. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br>

. Acesso em: 1 jun. 2024.

SANTOS, I. S. S. Impactos ambientais gerados pelos resíduos têxteis no Brasil e alternativas para o futuro: uma revisão sistemática. 2020. Trabalho de Conclusão de

Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

SKOOG, D. A. et al. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. 9. ed. Belmont: Brooks/Cole; Cengage Learning, 2014.

SOUZA, K. C.; ANTUNES, M. L. P. Adsorção do corante reativo azul 19 em solução aquosa por lama vermelha tratada quimicamente com peróxido de hidrogênio. *Química Nova*, v. 44, n. 5, p. 627–634, 2021.

UTAH STATE UNIVERSITY. Biochar. Disponível em: <https://extension.usu.edu/planthealth/research/biochar>. Acesso em: 17 out. 2024.

YAASHIKAA, P. R. et al. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Sustainability*, v. 14, p. 9397, 2022.

ZAFEER, M. K. et al. Sugarcane bagasse-based biochar and its potential applications: a review. *Emergent Materials*, v. 7, p. 133–161, 2024.

ZAHRA, Z. et al. Overview on recent developments in the design, application, and impacts of nanofertilizers in agriculture. *Sustainability*, v. 14, p. 9397, 2022.