

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO UTILIZANDO CASCA DE SOJA COMO ADSORVENTE ALTERNATIVO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

Orientadora: Prof.ª Dra. Luciane Dias Pereira

GUSTAVO HENRIQUE DE DEUS

GUSTAVO HENRIQUE DE DEUS

ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO UTILIZANDO CASCA DE SOJA COMO ADSORVENTE ALTERNATIVO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

Trabalho de Conclusão do Curso de Licenciatura em Química apresentado à Coordenação de Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás-Campus Anápolis, sob a orientação da Profª. Dra. Luciane Dias Pereira.

ANÁPOLIS – GO

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Deus, Gustavo Henrique de.

D486a Adsorção do corante azul de metileno utilizando casca de soja como adsorvente alternativo para tratamento de efluentes / Gustavo Henrique de Deus. – Anápolis: IFG, 2026.
69 f. : il. color.

Orientador: Profª. Dra. Luciane Dias Pereira.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás: Campus Anápolis – Licenciatura em Química, 2026.

1. Lignocelulósicos. 2. Biomassa. 3. Casca de soja. 4. Resíduos agroindustriais. 5. Tratamento de efluentes.
I. Pereira, Luciane Dias (orient.).
II. Título

CDD 541.33

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Matheus Rocha Piacenti CRB1/02992
IFG Campus Anápolis

INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

[ ] Tese
[ ] Dissertação
[ ] Monografia – Especialização
[X] TCC - Graduação
[ ] Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____
[ ] Artigo Científico
[ ] Capítulo de Livro
[ ] Livro
[ ] Trabalho Apresentado em Evento

Nome Completo do Autor: Gustavo Henrique de Deus.
Matrícula: 20211060020382.
Título do Trabalho: Adsorção do corante azul de metileno utilizando casca de soja como adsorvente alternativo para tratamento de efluentes.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ( ) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ___/___/_____ (Embargo);
3. ( ) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Aoindicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

( ) O documento está sujeito a registro de patente.
( ) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
( ) Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis, 30/07/2026.

Gustavo Henrique de Deus
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

GUSTAVO HENRIQUE DE DEUS

ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO UTILIZANDO CASCA DE SOJA COMO ADSORVENTE ALTERNATIVO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Química do Instituto Federal de Goiás – IFG – Câmpus Anápolis, como parte das exigências do curso de Licenciatura em Química para obtenção do título de licenciado em Química.

Área de concentração: Química

Aprovada em 10 de 07 de 2026

Luciane Dias Pereira

Prof(a). Dra. Luciane Dias Pereira
IFG – Câmpus Anápolis

Rejane Dias Pereira Mota

Prof.(a). Dra. Rejane Dias Pereira Mota
IFG – Câmpus Anápolis

Lilian Tatiane Ferreira de Melo Camargo

Prof.(a). Lilian Tatiane Ferreira de Melo Camargo
IFG – Câmpus Anápolis

Anápolis - Goiás - Brasil
Julho - 2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, que, com amor e cuidado, me ensinou a caminhar mesmo diante das dificuldades, e ao meu pai, que se interpôs, ainda que de forma indireta, aos desafios da vida, removendo os obstáculos do caminho. Ao meu padrasto, que por tantos anos esteve presente nos trajetos da minha vida, levando-me e buscando-me no colégio. Na época, eram apenas percursos cotidianos; hoje compreendo que cada ida e cada volta carregavam cuidado, dedicação e afeto, ajudando a conduzir meus passos quando eu ainda aprendia a encontrar meu próprio caminho. A todos, minha mais profunda gratidão por terem enfrentado um caminho de pedras para que eu pudesse trilhar um caminho brilhante. Agradeço à Karoline Pereira Lacerda, companheira de vida, que segue ao meu lado em qualquer estrada que o destino nos apresentar.

RESUMO

A contaminação de corpos hídricos por corantes sintéticos provenientes de resíduos agroindustriais, especialmente dos setores têxtil, alimentício, farmacêutico e de papel e celulose, representa um importante desafio ambiental devido à elevada estabilidade desses compostos e à dificuldade de remoção pelos tratamentos convencionais. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial da casca de soja, na forma pura e após modificação química com ácido sulfúrico, como biossorvente para remoção do corante azul de metileno em solução aquosa. As amostras foram caracterizadas quanto ao pH, teor de umidade, teor de cinzas, morfologia superficial e composição elementar, e os ensaios de adsorção foram monitorados por espectrofotometria UV-Vis. A modificação química promoveu aumento do teor de umidade, redução do teor de cinzas, incorporação de enxofre à superfície da biomassa e alterações morfológicas observadas por microscopia eletrônica de varredura. Entretanto, essas modificações não resultaram em melhoria do desempenho adsortivo. A casca de soja na forma pura apresentou maior eficiência de remoção do azul de metileno, com redução da absorbância de 2,46 para 0,06 após 90 minutos de contato, enquanto a biomassa modificada apresentou absorbância residual de 0,15 no mesmo período. Os dados experimentais da casca de soja pura apresentaram excelente ajuste aos modelos de Langmuir (R^2 = 0,9875) e Freundlich (R^2 = 0,9809), sendo compatíveis com adsorção predominantemente em monocamada sobre uma superfície heterogênea. Em contraste, os modelos não descreveram adequadamente o comportamento da biomassa modificada, indicando que o tratamento com ácido sulfúrico, nas condições empregadas, não aumentou sua capacidade adsortiva e possivelmente promoveu alterações estruturais que reduziram a afinidade pelo corante. Conclui-se que a casca de soja, em sua forma natural, apresenta elevado potencial como biossorvente de baixo custo e fonte renovável para aplicação na remoção de corantes catiônicos em soluções aquosas e no tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Lignocelulósicos; biomassa; casca de soja; resíduos agroindustriais; tratamento de efluentes; corantes catiônicos.

ABSTRACT

The contamination of water bodies by synthetic dyes from agro-industrial waste—particularly from the textile, food, pharmaceutical, and pulp and paper sectors—poses a significant environmental challenge due to the high stability of these compounds and the difficulty of removing them via conventional treatment methods. In this context, this study aimed to evaluate the potential of soybean hulls—both in their raw form and after chemical modification with sulfuric acid—as biosorbents for removing methylene blue dye from aqueous solution. The samples were characterized in terms of pH, moisture content, ash content, surface morphology, and elemental composition, while adsorption assays were monitored using UV-Vis spectrophotometry. Chemical modification led to increased moisture content, reduced ash content, the incorporation of sulfur onto the biomass surface, and morphological changes observed via scanning electron microscopy. However, these modifications did not result in improved adsorption performance. Raw soybean hulls demonstrated higher methylene blue removal efficiency, reducing absorbance from 2.46 to 0.06 after 90 minutes of contact, whereas the modified biomass showed a residual absorbance of 0.15 over the same period. Experimental data for the raw soybean hulls showed an excellent fit to the Langmuir (R^2 = 0.9875) and Freundlich (R^2 = 0.9809) models, consistent with predominantly monolayer adsorption on a heterogeneous surface. In contrast, these models did not adequately describe the behavior of the modified biomass, indicating that sulfuric acid treatment—under the conditions employed—did not enhance its adsorption capacity and likely induced structural changes that reduced its affinity for the dye. It is concluded that soybean hulls, in their natural form, show high potential as a low-cost biosorbent and renewable source for the removal of cationic dyes from aqueous solutions and for wastewater treatment.

Keywords: Lignocellulosics; biomass; soybean hulls; agro-industrial residues; wastewater treatment; cationic dyes.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estudos sobre aplicação da casca de soja em processos de adsorção. 17

Tabela 2. Concentrações obtidas a partir da solução estoque de Azul de Metileno. 35

Tabela 3. Resultados de pH durante a neutralização da amostra de casca de soja modificada. 38

Tabela 4. Resultados de pH durante a neutralização da amostra de casca de soja pura. 40

Tabela 5. Resultado da determinação do teor de umidade. 42

Tabela 6. Resultados da determinação do teor de cinzas para casca de soja modificada. 43

Tabela 7. Resultados da determinação do teor de cinzas para casca de soja pura. 43

Tabela 8. Dados experimentais da adsorção de azul de metileno da casca de soja pura. 46

Tabela 9. Parâmetros dos modelos de adsorção – casca de soja pura 46

Tabela 10. Dados experimentais da adsorção de azul de metileno utilizando casca de soja modificada. 51

Tabela 11. Composição elementar da casca de soja pura obtida por EDX. 58

Tabela 12. Composição elementar da casca de soja modificada obtida por EDX. 61

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Casca de soja. 16

Figura 2. Fórmula Estrutural do Azul de Metileno. 20

Figura 3. Casca de soja pura 33

Figura 4. Amostras trituradas no moinho de facas 33

Figura 5. CSM sob agitação constante. 34

Figura 6. CSM na etapa de filtração a vácuo. 34

Figura 7. Solução Estoque do corante Azul de Metileno. 35

Figura 8. Soluções homogeneizadas 36

Figura 9. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da casca de soja pura nas ampliações de (a) 120x, (b) 400x e (c) 500x. 57

Figura 10. Espectros de EDX da casca de soja pura obtidos em diferentes pontos de análise: (a) ponto 1, (b) ponto 2 e (c) ponto 3. 58

Figura 11. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da casca de soja modificada nas ampliações de (a) 120x, (b) 400x e (c) 500x. 59

Figura 12. Espectros de EDX da casca de soja modificada obtidos em diferentes pontos de análise: (a) ponto 1, (b) ponto 2 e (c) ponto 3. 61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva de calibração do Azul de Metileno. 37

Gráfico 2. Casca de soja modificada – Neutralização do pH. 39

Gráfico 3. Casca de soja pura – Neutralização do pH. 41

Gráfico 4. Isoterma de Adsorção – Casca de Soja Pura. 48

Gráfico 5. Isoterma de Freundlich – Casca de Soja Pura. 49

Gráfico 6. Isoterma de Langmuir – Casca de Soja Pura. 50

Gráfico 7. Isoterma de Adsorção – Casca de Soja Modificada. 52

Gráfico 8. Isoterma de Freundlich – Casca de Soja Modificada. 54

Gráfico 9. Isoterma de Langmuir – Casca de soja Modificada. 55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Tipos de corantes e suas características. 19

Quadro 2. Métodos de tratamento de efluentes contendo corantes, vantagens e limitações... 22

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CSP: Casca de Soja Pura

CSM: Casca de Soja Modificada

mg: Miligramas

meq: Mili-equivalente

DQO: Demanda química de oxigênio

MEV: Microscopia eletrônica de Varredura

kV: Quilovolt

UV: Ultravioleta

rpm: Rotações por minuto

h: Horas

min: Minutos

mL: Mililitros

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13

2. OBJETIVOS 15

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16

3.1 Casca de soja 16

3.2 Modificação Química da Biomassa 17

3.3 Corantes e impactos ambientais 18

3.4 Corante Azul de Metileno 20

3.5 Tratamento de efluentes 21

3.6 Tratamento de adsorção 23

3.7 Aspectos que influenciam a adsorção 24

3.8 Lei de Lambert-Beer 25

3.9 Isotermas de Langmuir e Freundlich 25

3.10 Caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura . 27

4. METODOLOGIA 28

4.1 Obtenção e preparo do adsorvente 28

4.2 Modificação química com ácido sulfúrico 28

4.3 Preparação das soluções do adsorvato 29

4.4 Caracterização físico-química da casca de soja 29

4.4.1 pH 29

4.4.2 Determinação do teor de umidade 29

4.4.3 Determinação do teor de cinzas 30

4.5 Ensaios de Adsorção 30

4.6 ANÁLISE MORFOLÓGICA (MEV) 31
4.7 TRATAMENTO DOS DADOS 31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 32
5.1 PREPARO DO ADSORVENTE 32
5.2 MODIFICAÇÃO QUÍMICA COM ÁCIDO SULFÚRICO 33
5.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO E PREPARO DAS SOLUÇÕES 34
5.4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA 38
5.4.1 AVALIAÇÃO DO PH DAS AMOSTRAS 38
5.4.2 TEOR DE UMIDADE 42
5.4.3 TEOR DE CINZAS 43
5.5 AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS DE ADSORÇÃO 44
5.6 RESULTADOS DA ANÁLISE MORFOLÓGICA (MEV) 56
6. CONCLUSÃO 64
REFERÊNCIAS 66

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades industriais nas últimas décadas tem contribuído para o aumento da geração de efluentes líquidos contendo substâncias potencialmente tóxicas ao meio ambiente. Entre os principais contaminantes destacam-se os corantes sintéticos, amplamente utilizados nos setores têxtil, alimentício, farmacêutico e de papel e celulose (Guaratini; Zanoni, 2000; Harazono; Nakamura, 2005). Quando descartados inadequadamente, esses compostos comprometem a qualidade dos recursos hídricos, afetam organismos aquáticos e podem representar riscos à saúde humana (Khelifi *et al.,* 2009).

Os corantes sintéticos apresentam elevada estabilidade química e estrutural, característica que dificulta sua degradação por processos naturais e por métodos convencionais de tratamento de efluentes. Além de causar alterações visuais nos corpos d'água, sua presença reduz a penetração da luz solar, interferindo nos processos fotossintéticos e contribuindo para o aumento da carga poluidora dos sistemas aquáticos (Kunz *et al.,* 2002; Yagub *et al.,* 2014).

A adsorção destaca-se entre as tecnologias mais promissoras para a remoção de contaminantes em meio aquoso, devido à sua elevada eficiência, simplicidade operacional e viabilidade econômica, sendo amplamente aplicada no tratamento de efluentes industriais (Nascimento *et al.,* 2014). Entre as alternativas disponíveis, destaca-se pela elevada eficiência, simplicidade operacional e viabilidade econômica. Esse processo tem sido amplamente empregado na remoção de diversos contaminantes presentes em soluções aquosas, incluindo corantes, metais pesados e compostos orgânicos, constituindo uma importante ferramenta para o tratamento de efluentes industriais (Nascimento *et al.,* 2014).

O azul de metileno é um corante catiônico amplamente utilizado como molécula modelo em estudos de adsorção devido à sua estabilidade química, elevada solubilidade em água e facilidade de detecção analítica (Jorge; Tavares; Santos, 2015; Müller *et al.,* 2019). Sua presença em efluentes industriais está associada à deterioração da qualidade da água, justificando sua utilização como adsorvato neste estudo (Oliveira; Coelho; Melo, 2018).

Nesse cenário, a utilização de resíduos agroindustriais como adsorventes tem despertado crescente interesse devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e potencial de reaproveitamento. A casca de soja destaca-se entre esses materiais por sua composição lignocelulósica, constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes que favorecem a presença de grupos funcionais capazes de interagir com diferentes contaminantes (Silva *et al.,* 2018; Alves *et al.,* 2019). Além disso, o aproveitamento desse resíduo contribui para a redução dos impactos ambientais associados ao seu descarte.

Além das características naturais da biomassa, modificações químicas podem ser empregadas para aumentar a disponibilidade de sítios ativos e melhorar o desempenho adsortivo dos materiais lignocelulósicos. Dessa forma, a comparação entre a casca de soja pura (CSP) e a casca de soja modificada (CSM) permite avaliar a influência do tratamento químico na remoção do corante.

Apesar de estudos anteriores evidenciarem o uso da casca de soja como adsorvente, ainda existem divergências na literatura quanto à real eficiência do tratamento químico ácido na melhoria do desempenho adsortivo, especialmente para a remoção de corantes básicos como o azul de metileno.

Diante da necessidade de desenvolver alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos, a utilização de resíduos agroindustriais como materiais adsorventes apresenta grande potencial ambiental e econômico. Nesse contexto, a casca de soja destaca-se por sua elevada disponibilidade, baixo custo e composição lignocelulósica favorável aos processos de adsorção. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial da CSP e CSM quimicamente com ácido sulfúrico na remoção do corante azul de metileno em solução aquosa, por meio da caracterização físico-química do material e da investigação de seu comportamento adsortivo.

2. OBJETIVOS

Avaliar o potencial da casca de soja pura e da casca de soja modificada com ácido sulfúrico como adsorventes na remoção do corante azul de metileno em solução aquosa.

2.1 Objetivos Específicos

• Caracterizar a casca de soja pura e a casca de soja modificada com ácido sulfúrico por meio da determinação do pH, do teor de umidade e do teor de cinzas;

• Construir a curva de calibração do azul de metileno por espectrofotometria UV-Vis para determinação das concentrações do corante;

• Avaliar a influência do tempo de contato na adsorção do azul de metileno pela casca de soja pura e modificada, determinando a eficiência de remoção do corante;

• Aplicar os modelos de Langmuir e Freundlich para descrever o comportamento adsortivo e interpretar o equilíbrio do sistema;

• Caracterizar a morfologia e a composição elementar superficial da casca de soja pura e modificada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDX);

• Comparar a influência da modificação química nas propriedades físico-químicas, morfológicas e adsortivas da casca de soja, verificando seus efeitos na remoção do azul de metileno.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Casca de soja

A casca de soja é um resíduo agroindustrial obtido durante o processamento dos grãos, representando aproximadamente 8 a 10% da massa total da soja, conforme a figura 1 que ilustra a casca de soja. Devido à elevada produção dessa cultura no Brasil, grandes quantidades desse subproduto são geradas anualmente, tornando seu aproveitamento uma alternativa ambientalmente e economicamente viável (Mielenz *et al.,* 2009).

Figura 1. Casca de soja.



O Brasil destaca-se entre os maiores produtores mundiais de soja, sendo o grão destinado principalmente à extração de óleo, processo que gera resíduos como farelo e casca. Embora a casca de soja seja comumente utilizada como ingrediente na alimentação animal, o elevado volume produzido faz com que parte desse resíduo não seja aproveitada, sendo frequentemente destinada a aterros sanitários (Cusioli *et al.,* 2019; Santos *et al.,* 2020).

A composição química da casca de soja favorece sua aplicação biotecnológica, apresentando teores de celulose entre 29% e 51%, hemicelulose entre 10% e 20% e baixos níveis de lignina (1% a 4%). Além disso, contém pectina (6% a 15%) e proteínas (9% a 14%), ampliando suas possibilidades de uso, tanto na alimentação animal quanto como material adsorvente (Mielenz *et al.,* 2009).

Alguns estudos na literatura têm demonstrado a eficiência da casca de soja na remoção de contaminantes. Rigueto *et al.* (2019) observaram elevada remoção do corante azul de metileno utilizando CSM. De forma semelhante, Li *et al.* (2011) verificaram resultados satisfatórios na remoção de íons metálicos, evidenciando o potencial desse material como biossorvente.

A Tabela 1 apresenta alguns estudos relacionados à utilização da casca de soja como adsorvente, destacando o adsorvato utilizado, o tipo de modificação aplicada e a capacidade de adsorção obtida.

Tabela 1. Estudos sobre aplicação da casca de soja em processos de adsorção.

Adsorvato	Modificação	Capacidade de Adsorção	Referência
Corante azul de metileno	NaOH 0,01 mol L^{-1}	16,46 mg g^{-1}	Rigueto *et al*. (2019)
Pb^{2+}	NaOH	217 mg g^{-1}	Li *et al*. (2011)
Pb^{2+}	NaOH	0,69 meq.g^{-1}	Módenes *et al*. (2015)
Cd^{2+}	NaOH	0,40 meq.g^{-1}	Módenes *et al*. (2015)

Fonte: Adaptado de Rigueto *et al*. (2019), Li *et al*. (2011), Módenes *et al*. (2015) e Colombo (2013).

3.2 Modificação Química da Biomassa

A modificação química constitui uma estratégia amplamente utilizada para melhorar as propriedades adsortivas de materiais lignocelulósicos. Esses tratamentos promovem alterações estruturais capazes de aumentar a disponibilidade de sítios ativos e favorecer a interação entre adsorvente e adsorvato. Além disso, diferentes tipos de biomassa apresentam capacidade natural de adsorver contaminantes, característica que pode ser significativamente potencializada por modificações químicas. Tais materiais destacam-se por serem economicamente viáveis, biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis (Paz; Garnica; Curbelo, 2018).

Estudos realizados por Gong *et al.* (2008) demonstraram que modificações com ácido fosfórico aumentaram a eficiência da casca de soja na remoção de corantes básicos. De forma semelhante, Módenes *et al.* (2015) observaram melhorias na remoção de íons metálicos após tratamentos químicos específicos. Além disso, ao submeterem a casca de soja a tratamento alcalino com hidróxido de sódio seguido de modificação com ácido cítrico, verificaram aumento da capacidade de adsorção de cádmio e cobre, evidenciando que tratamentos químicos adequados podem potencializar o desempenho da biomassa (Paz; Garnica; Curbelo, 2018).

Colombo (2013) avaliou dois tratamentos químicos da casca de soja para remoção de cádmio e chumbo, sendo em solução de ácido fosfórico e hidróxido de sódio, observando que a eficiência adsortiva depende das condições de modificação empregadas. Os resultados

demonstraram que determinados tratamentos podem aumentar ou reduzir a capacidade de adsorção, evidenciando a importância da caracterização prévia da biomassa.

3.3 Corantes e impactos ambientais

Os corantes sintéticos são amplamente utilizados em diversos setores industriais, especialmente nas indústrias têxtil, alimentícia, farmacêutica, de papel e de cosméticos. Durante os processos produtivos, parte desses compostos não é incorporada ao produto final, sendo descartada juntamente com os efluentes industriais. Na indústria têxtil, estima-se que até 50% dos corantes utilizados não sejam fixados às fibras, passando a compor as águas residuais juntamente com outros produtos químicos empregados no processo de tingimento (Cardoso, 2012).

A presença de corantes nos corpos hídricos constitui um problema ambiental relevante devido à sua elevada estabilidade química e resistência à degradação natural. Além de causar impacto visual pela alteração da coloração da água, esses compostos reduzem a penetração da luz solar, comprometendo a fotossíntese de organismos aquáticos e alterando o equilíbrio dos ecossistemas. Alguns corantes também apresentam propriedades tóxicas, mutagênicas e potencialmente carcinogênicas, oferecendo riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Khelifi *et al.,* 2009; Yagub *et al.,* 2014).

Entre os diversos tipos de corantes utilizados industrialmente, destacam-se os corantes básicos, caracterizados pela formação de íons positivos em solução aquosa. Esses compostos apresentam elevada solubilidade em água e forte interação com superfícies carregadas negativamente, características que influenciam diretamente os processos de adsorção empregados para sua remoção (Cardoso, 2012).

As moléculas dos corantes apresentam dois componentes principais em sua estrutura: um grupo cromóforo, responsável pela cor, e um grupo funcional, que promove a fixação do corante às fibras têxteis. A fixação da molécula do corante às fibras ocorre, geralmente, em solução aquosa e pode envolver diferentes tipos de interações, como interações iônicas, ligações de hidrogênio, forças de van der Waals e ligações covalentes (Cardoso, 2012).

O Quadro 1 apresenta a classificação dos corantes de acordo com a sua fixação, e suas principais características.

Quadro 1. Tipos de corantes e suas características.

Tipo de Corantes	**Características**
Corantes Reativos	Possuem grupo eletrofílico capaz de formar ligação com grupos hidroxila.
Corantes Diretos	Compostos solúveis em água capazes de tingir fibras de celulose, como o algodão. Geralmente apresentam mais de um grupo azo (diazo e triazo).
Corantes Azóicos	Compostos coloridos e insolúveis em água, com alta fixação e resistência à luz e umidade. Na presença de sal diazônio, podem formar compostos solúveis pela reação com um corante precursor sem grupo sulfônico.
Corantes Ácidos	Solúveis em água, compõem um grande grupo de corantes aniônicos com um a três grupos sulfônicos. São aplicados principalmente em fibras proteicas e apresentam estruturas químicas baseadas em compostos azo, antraquinona, triarilmetano, azina, xanteno, cetonimina, nitro e nitroso.
Corantes à Cuba	Derivados de índigos, tioindigóides e antraquinóides. São insolúveis em água e, no tingimento, são reduzidos em solução alcalina para a forma solúvel (leuco), que é posteriormente oxidada para regenerar o corante original fixado à fibra.
Corantes de Enxofre	Compostos por macromoléculas com pontes de polissulfetos (-Sn-), insolúveis em água. Amplamente utilizados na tintura de fibras celulósicas, conferem tonalidades como preto, verde-oliva e azul.
Corantes Dispersivos	Insolúveis em água, aplicados em fibras celulósicas e hidrofóbicas na forma de suspensão, com partículas de 1 a 4 μm.
Corantes Pré-Metalizados	Indicados para fibras proteicas e poliamidas, apresentam grupos hidroxila ou carboxila na posição orto em relação ao cromóforo azo, permitindo a formação de complexos metálicos.
Corantes Branqueadores	Contêm grupos funcionais como carboxílicos, azometino (-N=CH-) e etilênicos (-CH=CH-), associados a sistemas aromáticos que produzem fluorescência na faixa de 430 a 440 nm sob luz ultravioleta.
Corantes Básicos	São corantes solúveis em água que, em solução, formam íons positivos (cátions). Possuem grupos funcionais básicos, como aminas protonadas ($–NH_3^+$), que permitem a interação eletrostática com substratos aniônicos. Indicados principalmente para fibras acrílicas, que possuem grupos $–SO_3^-$ na cadeia polimérica, garantindo alta afinidade e fixação. Apresentam cores muito vivas e intensas, porém, em geral, baixa solidez à luz e à lavagem quando aplicados a outras fibras.

Fonte: Adaptado de Guaratini; Zanoni, 2000.

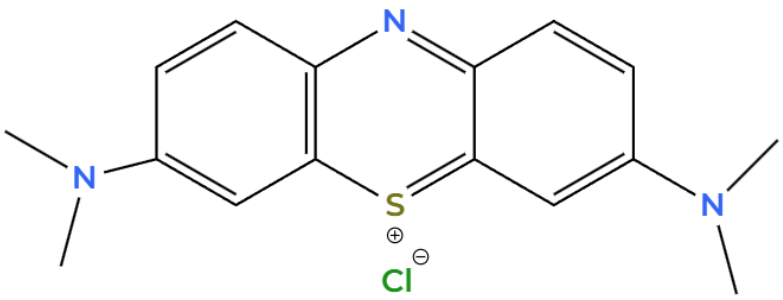
3.4 Corante Azul de Metileno

O azul de metileno é um corante pertencente à classe dos corantes básicos, cuja fórmula molecular é $C_{16}H_{18}N_3SCl$. Sua estrutura aromática heterocíclica e elevada estabilidade química torna esse composto amplamente utilizado em aplicações industriais e laboratoriais (Jorge; Tavares; Santos, 2015).

A presença de azul de metileno em efluentes industriais pode comprometer a qualidade da água, reduzindo a transparência dos corpos hídricos e dificultando a penetração da radiação solar. Como consequência, ocorre interferência nos processos fotossintéticos e possíveis efeitos tóxicos sobre organismos aquáticos (Oliveira; Coelho; Melo, 2018).

A Figura 2 apresenta a estrutura molecular do azul de metileno, evidenciando seu caráter aromático heterocíclico. Verifica-se a presença de dois anéis aromáticos ligados a átomos de nitrogênio, formando o núcleo do corante, e um grupo funcional tiônico ($–S^+–Cl^-$), responsável pela solubilidade em meio aquoso e pela capacidade de interagir com superfícies carregadas. Essa configuração química confere ao azul de metileno propriedades de cor intensa e estabilidade, características importantes para seu uso em processos industriais, mas que também contribuem para sua persistência em efluentes e o potencial impacto ambiental sobre ecossistemas aquáticos (Jorge; Tavares; Santos, 2015; Oliveira; Coelho; Melo, 2018).

Figura 2. Fórmula Estrutural do Azul de Metileno.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O azul de metileno é amplamente utilizado para avaliar a capacidade adsorvente de diferentes materiais, em razão de seu tamanho molecular compatível com a estrutura mesoporosa presente em muitos adsorventes. Essa característica possibilita uma análise mais precisa do processo de adsorção nos poros intermediários. Contudo, para compreender plenamente esse fenômeno, é necessário considerar não apenas as propriedades do material

adsorvente, mas também os aspectos cinéticos, termodinâmicos e as isotermas de equilíbrio que regem a interação entre adsorvato e adsorvente, assegurando assim uma avaliação abrangente do processo (Müller *et al.,* 2019).

Além de sua relevância ambiental, o azul de metileno é frequentemente utilizado como molécula modelo em estudos de adsorção devido à sua elevada solubilidade em água, estabilidade química e facilidade de quantificação por espectrofotometria UV-Vis. Sua natureza catiônica favorece a interação com materiais lignocelulósicos, permitindo avaliar a eficiência de diferentes adsorventes na remoção de contaminantes orgânicos (Müller *et al.,* 2019).

3.5 Tratamento de efluentes

Diversas tecnologias têm sido empregadas no tratamento de efluentes contendo corantes, incluindo processos físicos, químicos e biológicos. Entre elas destacam-se a coagulação-floculação, oxidação química, filtração por membranas, tratamentos biológicos e processos eletroquímicos. Entretanto, muitas dessas técnicas apresentam limitações relacionadas ao elevado custo operacional, geração de resíduos secundários ou baixa eficiência para determinados contaminantes (Yagub *et al.,* 2014).

A contaminação de corpos hídricos naturais representa um dos principais desafios ambientais da atualidade. Nesse cenário, a adoção de práticas de uso racional da água nos processos produtivos tem ganhado destaque, impulsionada tanto pelo seu crescente valor econômico quanto pela incorporação, na legislação brasileira, dos princípios de “consumidor-pagador” e “poluidor-pagador” (Kunz *et al.,* 2002).

A indústria têxtil, em particular, é responsável por elevado consumo de água em processos de tingimento e beneficiamento de fibras, resultando na geração de grandes volumes de efluentes contendo corantes, surfactantes, íons inorgânicos, agentes umectantes e outras substâncias. O principal impacto ambiental desses efluentes decorre da absorção de luz no meio aquático, o que compromete a fotossíntese de plantas e algas. Diante disso, torna-se essencial um planejamento ambiental que contemple a maximização da remoção de corantes, a redução das perdas no tingimento e o reuso da água (Queiroz *et al.,* 2019).

O Quadro 2 apresenta os principais métodos de tratamento de efluentes contendo corantes, organizados por categorias, destacando suas vantagens e limitações.

Quadro 2. Métodos de tratamento de efluentes contendo corantes, vantagens e limitações.

Categoria/Método	Principais Vantagens	Limitações
Tratamentos Químicos		
Processos Oxidativos	Aplicação fácil e capacidade de degradação rápida	Necessidade de ativação química e possibilidade de geração de resíduos sólidos
Reagente de Fenton ($H_2O_2 + Fe^{2+}$)	Alta eficiência na degradação de contaminantes	Produção significativa de lodo
Ozonização	Aplicável na forma gasosa e sem aumento no volume de efluentes	Baixa estabilidade do ozônio, com rápida decomposição
Fotocatálise	Não há formação de lodo e contribui para redução de odor.	Gerar subprodutos indesejáveis

Continuação do quadro 2. Métodos de tratamento de efluentes contendo corantes, vantagens e limitações.

Hipoclorito de sódio	Favorece a quebra de ligações em azo corantes	Liberação de compostos potencialmente tóxicos
Destruição eletroquímica	Elimina a utilização de reagentes químicos e formação de lodo	Alta vazão pode reduzir a eficiência de remoção
Tratamentos Biológicos		
Fungos degradadores	Uso de enzimas para degradar diferentes corantes	Produção enzimática instável em alguns casos
Consórcios bacterianos	Capacidade de descoloração em curto período	Limitação na degradação de azo corantes em condições aeróbicas
Biomassa microbiana	Afinidade com determinados tipos de corantes	Eficiência variável conforme a composição do corante
Sistemas anaeróbicos	Permite remover azo corantes e corantes solúveis	Produção de gases como metano e sulfeto de hidrogênio
Tratamentos Físicos		
Adsorção por carvão ativado	Alta eficiência para ampla gama de corantes	Custo elevado do adsorvente
Filtração por membranas	Remove praticamente todos os corantes	Formação de lodo concentrado
Troca iônica	Reutilização do adsorvente sem perda de capacidade	Não aplicável a todos os tipos de corantes
Irradiação	Promove oxidação eficiente em grande escala	Requer níveis elevados de oxigênio dissolvido
Coagulação eletrocinética	Alternativa economicamente viável	Produção elevada de lodo

Fonte: Adaptado de Yagub *et al.* (2014).

3.6 Tratamento de adsorção

A adsorção destaca-se como uma das tecnologias mais promissoras para remoção de corantes em meio aquoso. O processo consiste na transferência de moléculas presentes na fase líquida para a superfície de um material sólido, denominado adsorvente. Sua elevada eficiência, simplicidade operacional e possibilidade de utilização de materiais de baixo custo tornam a adsorção uma alternativa atrativa para o tratamento de efluentes industriais (Nascimento *et al.,* 2014).

O processo ocorre por meio do transporte do adsorvato, por difusão, da fase fluida até a interface líquido–sólido, impulsionado pelo gradiente de concentração entre a solução e a superfície do adsorvente. Uma vez na interface, as moléculas penetram nos microporos e ligam-se aos sítios ativos disponíveis. Assim, a eficiência de remoção está diretamente relacionada à área superficial acessível do adsorvente e ao tamanho molecular do adsorvato (Mccabe *et al.,* 2001).

A retenção do adsorvato pode se dar por dois mecanismos: adsorção física e adsorção química. Na adsorção física, ou fisissorção, as moléculas são atraídas por forças de Van der Waals e em contrapartida, a adsorção química, ou quimissorção, envolve a formação de ligações químicas específicas entre adsorvente e adsorvato, ocorrendo geralmente em monocamada, de forma praticamente irreversível e com calor de adsorção elevado, comparável ao de reações químicas. Esse processo é favorecido pelo aumento da temperatura (Youssef *et al.,* 2004; Urbano; Leite; Justo, 2021).

A eficiência do processo depende de fatores operacionais, tais como propriedades funcionais do adsorvente, estrutura porosa, irregularidades superficiais, presença de impurezas aderidas e granulometria das partículas. Para um bom desempenho, o adsorvente deve apresentar resistência térmica e mecânica, assim como a afinidade química com o adsorvato. A temperatura ambiente também influencia a eficiência, pois facilita o transporte do adsorvato para a superfície e o interior dos poros em função da menor viscosidade da solução, o que favorece a capacidade de adsorção (França, 2019).

A adsorção é um fenômeno físico-químico no qual átomos, íons ou moléculas de uma substância (chamada de adsorvato) se aderem à superfície de outra substância sólida ou líquida (conhecida como adsorvente). Esse processo é distinto da absorção, onde a substância é incorporada em todo o volume de outra substância (Urbano; Leite; Justo, 2021).

3.7 Aspectos que influenciam a adsorção

Diversos parâmetros operacionais, como pH, temperatura e características estruturais do carvão ativado, exercem influência direta sobre a eficiência e a aplicabilidade do processo de adsorção. Além disso, variáveis como pressão, concentração do adsorvato, tempo de contato e intensidade de agitação interferem tanto na cinética quanto no equilíbrio do sistema, sendo o ajuste adequado dessas condições essencial para a otimização do desempenho do processo (Santos, 2025).

O pH de uma solução aquosa afeta diretamente a carga superficial dos adsorventes, as propriedades das substâncias a serem removidas e seus graus de ionização, uma vez que o processo de adsorção está associado a interações eletrostáticas. Em condições básicas, ocorre o aumento da quantidade de sítios ativos com carga negativa na superfície do material adsorvente. No entanto, essa carga negativa desfavorece a remoção de corantes aniônicos, devido à repulsão eletrostática estabelecida entre as espécies presente (Oladipo; Gazi, 2014).

Em estudo realizado, Krishnani *et al*. (2008) destacaram que o pH exerce papel fundamental na adsorção de íons metálicos por biomatriz lignocelulósica proveniente de casca de arroz. Os autores observaram que valores baixos de pH reduzem a remoção em virtude da competição entre prótons e metais pelos sítios ativos, enquanto o aumento do pH reduz a carga superficial positiva e favorece a ligação de cátions metálicos. A faixa considerada ideal para a maioria dos metais foi entre 5,5 e 6,0, evitando a precipitação de hidróxidos metálicos. Para o Hg^{2+}, contudo, observou-se queda significativa na remoção em pH mais elevado devido à interferência de Mg^{2+} no processo de troca iônica.

A temperatura também exerce influência significativa nas propriedades e no desempenho do carvão ativado em diversas aplicações, pois afeta o movimento molecular e, consequentemente, as forças atrativas e repulsivas entre as moléculas presentes na fase líquida. Alterações térmicas podem modificar a solubilidade e o potencial químico do adsorvato, refletindo em mudanças na capacidade de adsorção. Além disso, o aumento da temperatura intensifica a velocidade dos processos físico-químicos envolvidos, resultando no incremento da constante de velocidade da adsorção (Santos, 2025).

Módenes *et al*. (2015) investigaram o efeito da temperatura na sorção de Cd^{2+} e Pb^{2+} utilizando casca de soja como adsorvente em sistemas binários. Os autores observaram que, sob pH 4 e agitação de 100 rpm, as temperaturas mais baixas, especialmente 30 °C, apresentaram melhor desempenho na remoção, com taxas máximas de 57% para Cd^{2+} e 72–73% para Pb^{2+}. Ademais, verificou-se que o tamanho das partículas do adsorvente não influenciou

significativamente as taxas de remoção dentro do desvio padrão experimental, o que permitiu a utilização de misturas de tamanhos de grãos nos experimentos subsequentes.

3.8 Lei de Lambert-Beer

A espectrofotometria UV-Vis é amplamente utilizada para determinação da concentração de espécies químicas em solução. Seu princípio baseia-se na Lei de Lambert-Beer, que estabelece uma relação diretamente proporcional entre a absorbância e a concentração da espécie absorvente, desde que o caminho óptico e as condições experimentais permaneçam constantes.

Essa lei estabelece que a absorbância de uma solução é diretamente proporcional à concentração da espécie absorvente, desde que o caminho óptico e as condições experimentais permaneçam constantes conforme expresso na Equação 1. Dessa forma, espera-se que o aumento da concentração resulte em um aumento proporcional da absorbância, comportamento observados nos dados experimentais obtidos

$$A = \varepsilon bc \qquad \textbf{(1)}$$

em que:

- A: Absorbância;
- Ɛ: Coeficiente de absortividade molar;
- b: Caminho óptico;
- c: Concentração da espécie absorvente.

Essa relação constitui a base para a construção de curvas de calibração utilizadas na determinação das concentrações antes e após os ensaios de adsorção.

3.9 Isotermas de Langmuir e Freundlich

O comportamento da adsorção pode ser avaliado quantitativamente por meio das isotermas de adsorção, que expressam a relação entre a quantidade de adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente e a concentração do adsorvato em solução no equilíbrio, em condições de temperatura constante. De modo geral, o formato gráfico dessas isotermas apresenta tendência hiperbólica, sendo o estudo do equilíbrio fundamental para a estimativa da capacidade máxima de adsorção dos materiais. O perfil da isoterma fornece informações relevantes sobre o mecanismo do processo, refletindo as interações entre adsorvente e

adsorvato, as quais podem variar em função da natureza dos materiais e de fatores ambientais, como pH e temperatura (Oliveira *et al.,* 2018).

As isotermas representam, portanto, curvas que correlacionam a quantidade de adsorvato adsorvida à concentração ou pressão do adsorvato em fase gasosa ou líquida. Para a análise de dados experimentais e previsão do comportamento da adsorção, diferentes modelos matemáticos podem ser empregados, entre os quais se destacam os modelos propostos por Langmuir (1918) e Freundlich (1906).

A isoterma de Langmuir, proposta por Langmuir (1918), é amplamente aplicada para descrever processos de adsorção, especialmente de corantes em superfícies sólidas. Esse modelo teórico parte da hipótese de que a adsorção ocorre em monocamada, sobre sítios idênticos e energeticamente homogêneos presentes na superfície do adsorvente. Considera-se, ainda, que não há formação de multicamadas, nem migração do adsorvato ao longo da superfície, e que cada molécula ocupa um único sítio sem interferência das demais. Assim, o modelo estabelece uma capacidade máxima de adsorção finita, correspondente ao recobrimento completo da monocamada (Langmuir, 1918).

A Equação (2) expressa matematicamente a isoterma de Langmuir:

Isoterma de Langmuir.

$$q_e = \frac{q_{max} \times K_L \times C_{eq}}{1 + K_L \times C_{eq}} \quad \textbf{(2)}$$

em que:

- q_e = quantidade de adsorvato adsorvida por unidade de massa do adsorvente no equilíbrio ($mg \cdot g^{-1}$);
- q_{max} = capacidade máxima de adsorção correspondente à monocamada ($mg \cdot g^{-1}$);
- K_L = constante de Langmuir, relacionada à afinidade entre adsorvente e adsorvato ($L \cdot mg^{-1}$);
- C_{eq} = concentração do adsorvato em equilíbrio na solução ($mg \cdot L^{-1}$).

O modelo de Freundlich, proposto por Freundlich (1906), é amplamente utilizado para descrever processos de adsorção em superfícies heterogêneas, caracterizando-se por uma relação empírica entre a concentração do adsorvato na fase fluida e a quantidade adsorvida. Diferentemente do modelo de Langmuir, admite superfícies energeticamente heterogêneas e pode representar processos de adsorção em multicamadas (Freundlich, 1906).

A Equação (3) expressa a isoterma de Freundlich:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \textbf{(3)}$$

em que:

- q_e: Quantidade de adsorvato adsorvido pela massa de adsorvente (mg g^{-1});
- K_F: Constante de Freundlich, relacionada à capacidade de adsorção (mg L^{-1})
- C_e: Concentração de equilíbrio do adsorvato em solução (mg L^{-1}).
- n: Constante de Freundlich indica intensidade de adsorção;

A aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich permite interpretar o comportamento do sistema adsorvente–adsorvato, fornecendo informações relevantes sobre a afinidade do corante pela superfície da biomassa e sobre os mecanismos envolvidos na adsorção.

3.10 Caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica amplamente utilizada na caracterização morfológica de materiais, permitindo a obtenção de imagens com elevada resolução da superfície de amostras sólidas. Seu princípio de funcionamento baseia-se na incidência de um feixe de elétrons sobre a superfície do material, gerando diferentes sinais decorrentes da interação elétron-matéria, como elétrons secundários, elétrons retroespalhados e raios X característicos, que fornecem informações sobre a topografia, composição e microestrutura da amostra (Goldstein *et al.,* 2018; Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

A análise por MEV possibilita a observação de características como rugosidade, fissuras, cavidades, poros e irregularidades estruturais, parâmetros importantes para a avaliação de materiais adsorventes. Em processos de adsorção, a morfologia superficial exerce influência direta na capacidade de remoção de contaminantes, uma vez que superfícies mais porosas e rugosas tendem a apresentar maior área específica e maior disponibilidade de locais de adsorção para interação com as moléculas adsorvidas (Nascimento *et al.,* 2014).

No caso de biomateriais lignocelulósicos, a MEV é frequentemente empregada para avaliar as alterações promovidas por tratamentos químicos ou físicos. Esses tratamentos podem provocar modificações na estrutura da biomassa, aumentando a exposição de grupos funcionais e favorecendo a formação de cavidades e poros que contribuem para o desempenho adsortivo do material (Gupta; Suhas, 2009).

Dessa forma, a caracterização morfológica por MEV constitui uma ferramenta importante para correlacionar as propriedades estruturais dos materiais com sua eficiência na remoção de contaminantes, auxiliando no desenvolvimento e na avaliação de novos adsorventes para aplicações ambientais.

4. METODOLOGIA

As análises foram realizadas no laboratório de química e de engenharia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) – Câmpus Anápolis e nos laboratórios de química da Universidade Estadual de Goiás de Ciências Exatas e Tecnológicas (UnuCEt) – Henrique Santillo (Anápolis-GO).

4.1 Obtenção e preparo do adsorvente

As cascas de soja pura (CSP) foram obtidas em julho de 2025 da empresa Granol localizada em Anápolis/GO. Após a obtenção das cascas, as amostras foram pesadas, posteriormente foram trituradas no moinho industrial (FORTINOX/moinho de facas tipo willye STAR FT 50). Após a trituração, aproximadamente 216,2 g de casca de soja foram submetidos à análise granulométrica utilizando peneiras de 3/8", 1/4", nº 4, 10, 16, 30, 50 e 100. Observou-se que aproximadamente 85,45% da massa ficou retida entre as peneiras nº 30 (600 μm) e nº 50 (300 μm), indicando predominância de partículas nessa faixa granulométrica. Após o peneiramento, o material foi acondicionado em recipientes herméticos e armazenado à temperatura ambiente até sua utilização nos ensaios experimentais.

4.2 Modificação química com ácido sulfúrico

Para a modificação química, 20 g de casca de soja foram tratados com 150 mL de solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1,0 mol L^{-1}, correspondente à razão sólido/líquido de 1:7,5 (m/v). A suspensão foi mantida sob agitação magnética contínua, em agitador magnético (Centauro) em velocidade “2” disposta no instrumento, durante 24 horas, à temperatura ambiente. Essas condições experimentais foram adotadas com o objetivo de promover alterações na superfície da biomassa, favorecendo a exposição de grupos funcionais potencialmente envolvidos no processo de adsorção. Após esse período, o material foi submetido à filtração a vácuo, lavado sucessivamente com água destilada até atingir pH próximo da neutralidade e, posteriormente, seco para utilização nas etapas de caracterização e nos ensaios de adsorção.

4.3 Preparação das soluções do adsorvato

As soluções de azul de metileno foram preparadas a partir de uma solução estoque de 25 mg L^{-1}. A partir dessa solução, foram obtidas diluições em diferentes concentrações (1,0; 2,5; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0 e 25,0 mg L^{-1}). Essas soluções foram utilizadas para a construção da curva de calibração e para a avaliação do comportamento adsortivo do sistema.

As leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis (METASH – 5100), utilizando cubetas de quartzo e comprimento de onda de 664 nm, empregando água destilada como branco analítico.

A utilização de diferentes concentrações permitiu investigar a interação entre o adsorvato e os materiais adsorventes, fornecendo subsídios para a interpretação dos fenômenos de adsorção e para a aplicação de modelos matemáticos de equilíbrio. Para os ensaios de adsorção em função do tempo, adotou-se a concentração de 25 mg L^{-1} por representar a condição mais crítica dentro da faixa experimental estudada. A escolha dessa concentração foi baseada no fato de representar a maior concentração da faixa estudada, possibilitando uma avaliação mais rigorosa da capacidade de adsorção dos materiais.

4.4 Caracterização físico-química da casca de soja

4.4.1 pH

Após a modificação química, a CSM foi submetida à filtração a vácuo em funil de Büchner e, posteriormente, lavada sucessivamente com água destilada aquecida a 50 °C até atingir pH próximo à neutralidade. O acompanhamento da neutralização foi realizado por meio da determinação do pH da água proveniente de cada etapa de lavagem (filtrado), utilizando um pHmetro digital mPA210 (Tecnopon®) previamente calibrado conforme as recomendações do fabricante. O valor de pH obtido na última lavagem foi considerado representativo da neutralização da amostra modificada. As determinações foram realizadas em triplicata para a CSM e para a CSP, utilizando alíquotas de 5 g de cada material.

4.4.2 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade das amostras de CSP e CSM foi determinado de acordo com a ABNT NBR 8112:1986 – Carvão vegetal – Análise imediata. As amostras foram previamente pesadas e submetidas à secagem em estufa a 105 °C até massa constante. Em seguida, foram resfriadas em dessecador e novamente pesadas para determinação da perda de massa associada à remoção da umidade. Os resultados foram expressos em porcentagem de umidade com base na massa inicial da amostra.

Para calcular o teor de umidade, foi utilizada a seguinte Equação 4:

$$Teor\ de\ umidade = \frac{M1-M2}{M1}\ x\ 100 \qquad \textbf{(4)}$$

em que:

- M_1: Massa da amostra úmida (g);
- M_2: Massa da amostra seca (g).

4.4.3 Determinação do teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas foi realizada de acordo com a metodologia oficial da AOAC (2000). Amostras de CSP e CSM foram pesadas em triplicata e acondicionadas em cadinhos previamente identificados. Inicialmente, as amostras foram submetidas à pré-queima em bico de Bunsen para remoção da matéria orgânica volátil. Em seguida, os cadinhos foram transferidos para forno mufla a 650 °C por aproximadamente 8 horas, promovendo a completa incineração da matéria orgânica.

Após a calcinação, os cadinhos foram resfriados em dessecador até temperatura ambiente e posteriormente pesados. O teor de cinzas foi calculado a partir da massa residual obtida após a incineração, sendo os resultados expressos em porcentagem em relação à massa inicial da amostra.

Para calcular o teor de cinzas, foi utilizada a seguinte Equação 5:

$$Teor\ de\ cinzas = \frac{M2}{M1}\ x\ 100 \qquad \textbf{(5)}$$

em que:

- M_1: Massa da amostra inicial (g);
- M_2: Massa da amostra após incineração.

4.5 Ensaios de Adsorção

Os ensaios de adsorção foram conduzidos em sistema batelada utilizando azul de metileno como adsorvato e a CSP e CSM como adsorventes, avaliando-se cada material separadamente. Em cada ensaio, foram adicionados 50 mg de adsorvente a 5 mL de solução de azul de metileno na concentração de 25 mg L^{-1}, em tubos de ensaio. Os tubos foram submetidos à centrifugação em centrífuga Daiki Spin Plus Titan, à velocidade de 2500 rpm, sendo realizadas coletas nos tempos de 0, 5, 10, 20, 30, 60 e 90 minutos. Em cada intervalo foi retirada uma alíquota de 2 mL para determinação da concentração residual do corante por

espectrofotometria UV-Visível (METASH 5100), utilizando cubeta de quartzo e comprimento de onda de 664 nm. Após cada coleta, foram adicionados 2 mL de água destilada ao tubo de ensaio para manutenção do volume total da suspensão durante o experimento.

Os dados experimentais obtidos foram utilizados para determinação da capacidade de adsorção dos materiais e para avaliação do comportamento de equilíbrio do sistema, possibilitando a aplicação de modelos matemáticos amplamente empregados em estudos de adsorção, sendo representada através da equação 6:

$$\text{onde: } qe = \frac{(C_0 - Ce)V}{m} \quad \textbf{(6)}$$

- qe = capacidade de adsorção (mg g^{-1});
- C_0 = concentração inicial (mg L^{-1});
- Ce = concentração no equilíbrio (mg L^{-1});
- V = volume da solução (L);
- m = massa do adsorvente (g).

4.6 Análise morfológica (MEV)

A morfologia superficial e a composição elementar da CSP e da CSM foram avaliadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando microscópio Hitachi TM3030 Plus, acoplado ao sistema de Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDX) Bruker XFlash® Min SVE3. Inicialmente, as amostras foram secas em estufa a 60 °C por 24 horas para remoção da umidade residual. Em seguida, foram fixadas em suportes metálicos (stubs) utilizando fita adesiva condutiva de carbono e submetidas à metalização com uma fina camada de ouro por pulverização catódica (sputtering), visando aumentar a condutividade elétrica e melhorar a qualidade das imagens obtidas. Posteriormente, as análises foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura, permitindo a avaliação dos aspectos morfológicos da superfície das amostras. A análise por EDX foi empregada para identificar qualitativamente e semiquantitativamente os principais elementos químicos presentes na superfície dos materiais, possibilitando comparar as alterações promovidas pela modificação química.

4.7 Tratamento dos dados

A capacidade de adsorção foi determinada a partir das concentrações inicial e residual do azul de metileno, obtidas por espectrofotometria UV-Visível utilizando a curva analítica

previamente construída. Os dados experimentais foram avaliados considerando a influência do tempo de contato e o comportamento de equilíbrio do sistema adsortivo.

Para a interpretação dos mecanismos envolvidos na adsorção, os resultados foram ajustados aos modelos de Langmuir e Freundlich por meio de suas formas linearizadas. O modelo de Langmuir foi empregado para avaliar a adsorção em monocamada sobre sítios ativos energeticamente homogêneos, enquanto o modelo de Freundlich foi utilizado para descrever a heterogeneidade superficial do adsorvente e possíveis interações adsorvente–adsorvato.

A partir das equações linearizadas foram obtidos os parâmetros característicos de cada modelo, incluindo a capacidade máxima de adsorção (qmax), a constante de Langmuir (KL), a constante de Freundlich (KF), o parâmetro de intensidade de adsorção (n) e o fator de separação (RL). Os coeficientes de determinação (R^2) foram utilizados para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos aos dados experimentais e auxiliar na interpretação da afinidade do azul de metileno pela superfície da casca de soja.

Os tratamentos estatísticos e a construção dos gráficos foram realizados utilizando o software Microsoft Excel.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Preparo do adsorvente

Foram obtidos 852,96 g de casca de soja (Figura 3), os quais apresentavam-se previamente secos, não sendo necessária a etapa de secagem em estufa. Em seguida, o material foi submetido à trituração em moinho de facas tipo Willey (STAR FT 50/FORTINOX) (Figura 4), visando à redução do tamanho das partículas e à homogeneização da biomassa.

Após a trituração, as amostras foram novamente pesadas, obtendo-se uma massa final de 809,18 g. A diferença entre a massa inicial e a massa final correspondeu a uma perda aproximada de 5,14%, atribuída principalmente ao processo de moagem e ao manuseio do material. Posteriormente, a casca de soja foi acondicionada em recipientes herméticos e armazenada à temperatura ambiente até sua utilização nos ensaios experimentais.

Figura 3. Casca de soja pura



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 4. Amostras trituradas no moinho de facas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2 Modificação química com ácido sulfúrico

Após a trituração da biomassa, foram separados 20 g de casca de soja para o processo de modificação química. A amostra foi tratada com 150 mL de solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) na concentração de 1,0 mol L^{-1}, mantendo-se sob agitação constante durante 24 horas (Figura 5), com o objetivo de promover alterações nas características superficiais do material.

Ao término do período de agitação, a suspensão foi submetida à filtração em sistema a vácuo utilizando funil de Büchner (Figura 6), permitindo a separação da fase líquida e a obtenção da CSM. Posteriormente, o material foi destinado às etapas de lavagem, neutralização e caracterização físico-química.

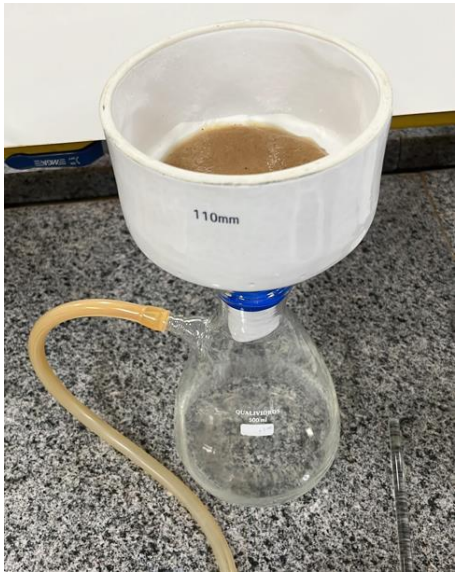
O tratamento ácido foi empregado com a finalidade de modificar a superfície da biomassa, favorecendo a exposição de grupos funcionais e a disponibilidade de sítios ativos potencialmente envolvidos no processo de adsorção do azul de metileno.

Figura 5. CSM sob agitação constante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 6. CSM na etapa de filtração a vácuo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.3 Curva de calibração e preparo das soluções

Para a quantificação das concentrações residuais de azul de metileno nos ensaios de adsorção, foi inicialmente construída a curva de calibração por espectrofotometria UV-Vis.

Preparou-se uma solução estoque do corante na concentração de 25 mg L^{-1}, conforme Figura 7.

A curva de calibração foi construída utilizando sete concentrações distintas de azul de metileno (Tabela 2 e Figura 8), abrangendo uma faixa adequada para a quantificação do corante nas amostras analisadas. A utilização de múltiplas concentrações permitiu avaliar o comportamento da resposta espectrofotométrica e estabelecer uma equação matemática para conversão dos valores de absorbância em concentração.

Figura 7. Solução Estoque do corante Azul de Metileno.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 2. Concentrações obtidas a partir da solução estoque de Azul de Metileno.

Concentração (mg L^{-1})	**Volume da solução estoque 25 mg L^{-1} (mL)**	**Volume de água destilada (mL)**
1,0	4,0	96,0
2,5	10,0	90,0
5,0	20,0	80,0
10,0	40,0	60,0
15,0	60,0	40,0
20,0	80,0	20,0
25,0	100,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

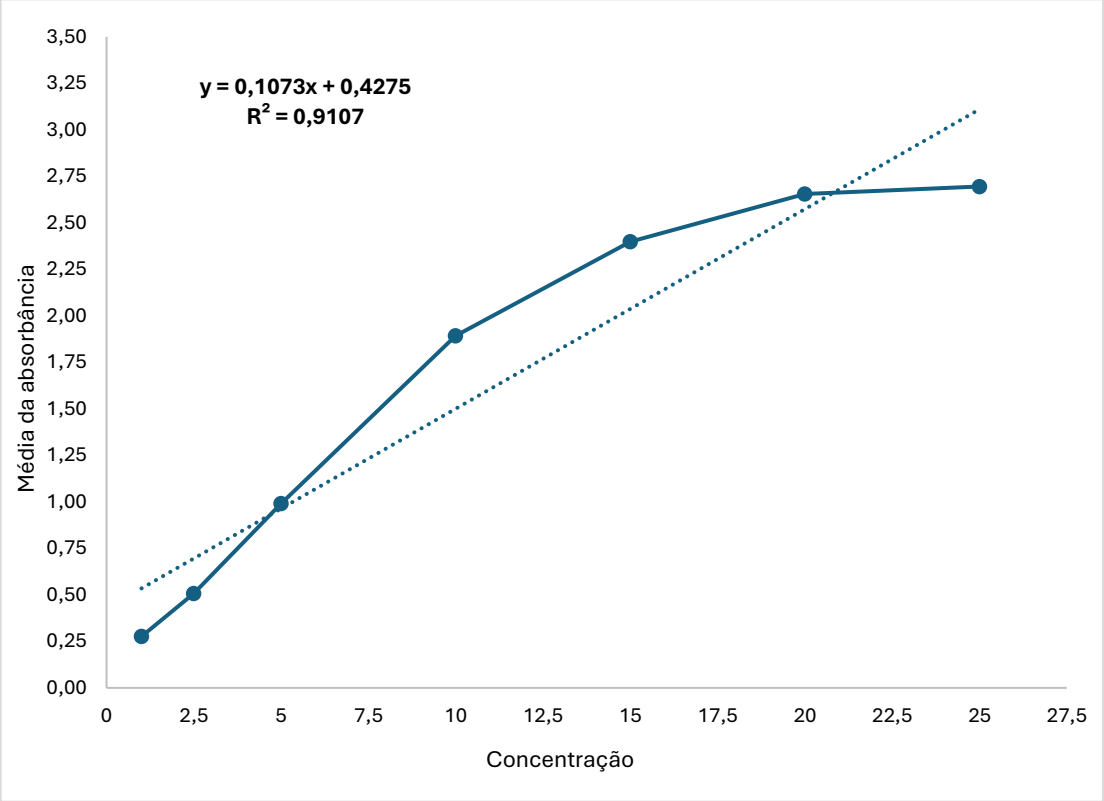
Figura 8. Soluções homogeneizadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com os valores obtidos, construiu-se a curva de calibração relacionando a absorbância em função da concentração do azul de metileno. O Gráfico 1 apresenta a curva de calibração do corante, cuja equação da reta foi $y = 0,1073x + 0,4275$, obtida através da regressão linear. Observou-se aumento da absorbância com o incremento da concentração do corante, comportamento compatível com a Lei de Beer-Lambert. A curva apresentou coeficiente de determinação de $R^2 = 0,9107$, indicando correlação linear moderada entre as variáveis. Embora a curva tenha sido adequada para estimar as concentrações residuais utilizadas neste estudo, o valor de R^2 sugere a ocorrência de variações experimentais, que podem estar relacionadas ao preparo das soluções padrão, à precisão da pipetagem, à presença de bolhas de ar na cubeta, à limpeza e ao posicionamento da cubeta no espectrofotômetro, ao preparo da solução branco ou às limitações instrumentais do equipamento utilizado.

Gráfico 1. Curva de calibração do Azul de Metileno.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Segundo Skoog, Holler e Crouch (2018), a Lei de Beer-Lambert é mais bem aplicada em soluções diluídas, sendo que concentrações elevadas podem provocar desvios recorrentes de interações entre moléculas absorventes, alterações no índice de refração da solução e limitações instrumentais associadas ao equipamento.

A concentração de 25 mg L^{-1} foi utilizada nos ensaios subsequentes de adsorção, conforme estabelecido na metodologia. A partir dessa condição experimental, foi possível avaliar o comportamento dos adsorventes ao longo do tempo de contato e acompanhar a evolução do processo adsortivo. Dessa forma, foi possível investigar a eficiência da CSP e CSM na remoção do azul de metileno ao longo do tempo, bem como identificar a tendência de estabilização do processo adsortivo.

A variação do tempo de contato entre adsorvente e adsorvato permitiu acompanhar a dinâmica da adsorção, fornecendo informações sobre a velocidade de remoção do corante e sobre a aproximação do equilíbrio do sistema. Esse procedimento é amplamente empregado em estudos preliminares de adsorção para avaliar o potencial de novos materiais adsorventes.

Além da sua aplicação para determinação das concentrações residuais durante os ensaios de adsorção, as diferentes concentrações preparadas permitiram avaliar o

comportamento do sistema em distintas condições experimentais, fornecendo informações importantes para a interpretação do equilíbrio adsortivo e para a aplicação dos modelos matemáticos de adsorção discutidos neste trabalho.

5.4 Resultados da caracterização físico-química

Na etapa de caracterização físico-química das amostras (CSM e CSP), foram realizadas a determinação do teor de umidade, cinzas e pH das amostras ativadas com H_2SO_4.

5.4.1 Avaliação do pH das amostras

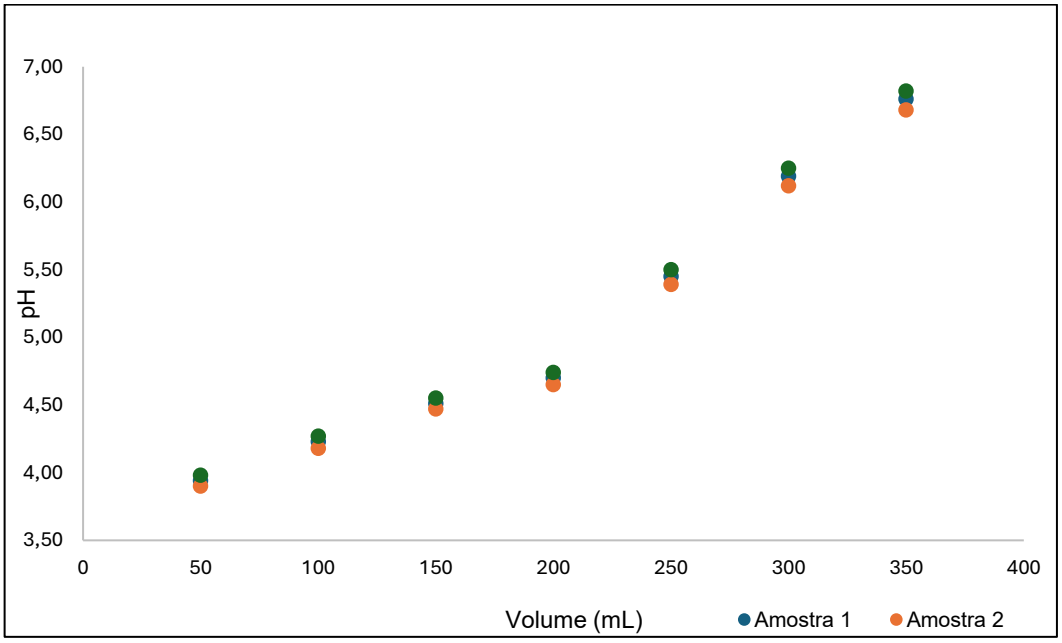
Os resultados da Tabela 3 e gráfico 2 demonstraram que a modificação com ácido sulfúrico promoveu acidificação da superfície da biomassa, refletida pelos baixos valores iniciais de pH observados para a CSM. As sucessivas lavagens promoveram a remoção dos resíduos ácidos remanescentes, elevando gradativamente o pH até valores próximos da neutralidade. Em contraste, a CSP apresentou valores praticamente constantes ao longo de todo o procedimento, evidenciando sua estabilidade química em meio aquoso.

Tabela 3. Resultados de pH durante a neutralização da amostra de casca de soja modificada.

Lavagem	CSM - pH	
	Média	**Desvio padrão**
1	3,94	0,04
2	4,23	0,05
3	4,51	0,04
4	4,70	0,05
5	5,45	0,06
6	6,19	0,07
7	6,72	0,06

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 2. Casca de soja modificada – Neutralização do pH.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise gráfica dos dados permite visualizar a tendência de aumento do pH ao longo das lavagens. O aumento do pH indica remoção progressiva dos resíduos ácidos adsorvidos na superfície da biomassa após a modificação química. Foi possível observar que o aumento do pH não ocorre de forma uniforme ao longo de todo o processo, sendo mais acentuado a partir de volumes superiores a 200 mL, o que sugere que as primeiras lavagens removeram frações mais facilmente solúveis, enquanto as etapas posteriores promovem a extração de compostos mais fortemente adsorvidos à matriz.

Além disso, nota-se uma tendência de estabilização do pH nos volumes finais, indicando que o sistema se aproxima de um estado de equilíbrio, no qual a maior parte dos compostos ácidos foi removida. Esse comportamento reforça a eficiência do processo de lavagem na neutralização da amostra modificada.

Portanto, a representação gráfica e os dados obtidos confirmam a tendência de aumento do pH ao longo das lavagens nas amostras de CSM, evidenciando a eficiência do processo de neutralização da CSM.

Resultados semelhantes foram observados por Colombo (2013), que avaliou a modificação química de resíduos lignocelulósicos e verificou que tratamentos ácidos promovem redução significativa do pH superficial dos materiais, tornando necessária a etapa de lavagem para remoção do excesso de reagentes e estabilização da biomassa. O autor destaca

que a neutralização adequada é fundamental para evitar interferências nos processos de adsorção e garantir maior disponibilidade de sítios ativos na superfície do adsorvente.

De maneira semelhante, Rigueto *et al.*, (2019) observaram que materiais lignocelulósicos submetidos à ativação química apresentaram aumento gradual do pH após sucessivas lavagens, comportamento atribuído à remoção de espécies ácidas adsorvidas na superfície da biomassa. Esses resultados corroboram os dados obtidos neste estudo, evidenciando a eficiência do procedimento de neutralização empregado.

Por outro lado, a CSP apresentou valores de pH (Tabela 4) próximos da neutralidade durante todo o procedimento, indicando que o material não sofreu alterações químicas significativas e possui estabilidade em meio aquoso. Esse comportamento confirma a efetividade do processo de modificação química e demonstra que as alterações observadas na CSM foram decorrentes da ativação realizada com ácido sulfúrico.

Ao longo das lavagens sucessivas, verifica-se apenas um leve aumento no pH, atingindo valores próximos de 6,70 a 6,80 ao final do processo. Essa variação discreta indica que a amostra não apresenta quantidades significativas de compostos ácidos solúveis, diferentemente do observado para a CSM.

Tabela 4. Resultados de pH durante a neutralização da amostra de casca de soja pura.

Lavagem	CSP - pH	
	Média	**Desvio padrão**
1	6,52	0,02
2	6,56	0,01
3	6,60	0,02
4	6,64	0,02
5	6,69	0,02
6	6,73	0,02
7	6,78	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O comportamento praticamente constante do pH ao longo das lavagens sugere que a CSP possui estabilidade química em relação ao meio aquoso, não sofrendo alterações relevantes quando submetida ao processo de lavagem. Esse resultado reforça que as mudanças observadas na CSM estão diretamente associadas ao tratamento químico aplicado, e não a características intrínsecas da biomassa. Adicionalmente, a baixa variação entre as triplicatas demonstra boa

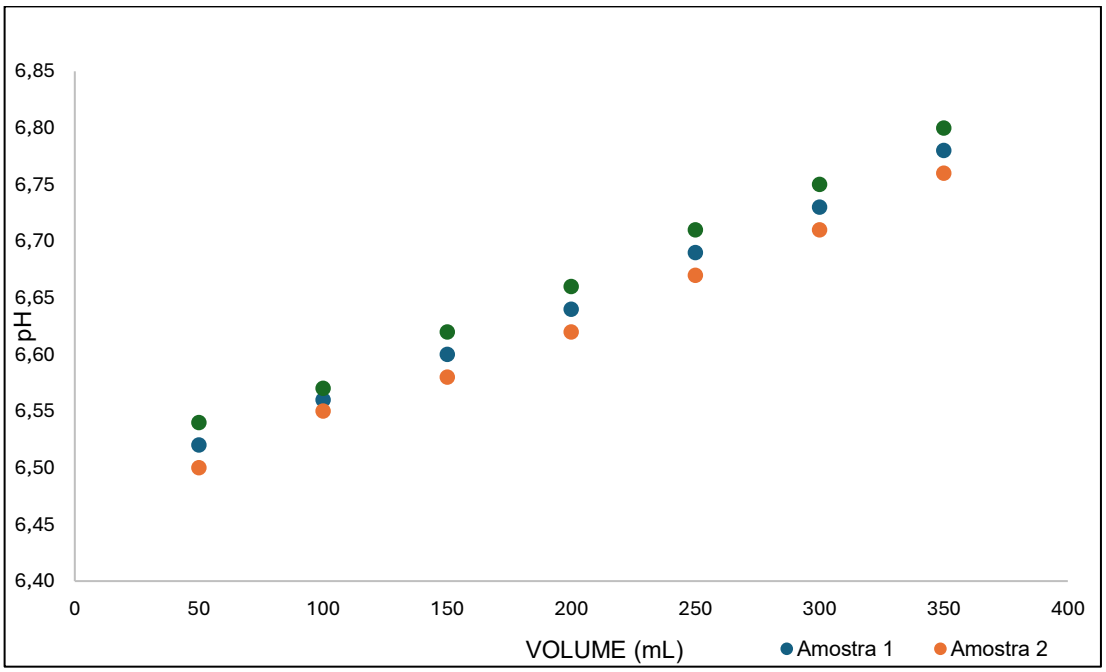
reprodutibilidade dos dados, indicando confiabilidade nos resultados obtidos e consistência no procedimento experimental.

Para uma melhor visualização do pH de CSP ao longo das lavagens, os dados obtidos estão apresentados no Gráfico 3.

A análise gráfica dos dados da CSP evidencia de forma clara a estabilidade dos valores de pH ao longo das lavagens sucessivas. Observa-se um perfil praticamente linear, com leve inclinação crescente, indicando variação pouco significativa durante todo o processo.

Diferentemente do comportamento observado para a CSM, o gráfico da CSP não apresenta mudanças abruptas ou variações acentuadas, reforçando a ausência de compostos ácidos em quantidades relevantes na amostra pura. Além disso, a proximidade entre os pontos ao longo de toda a curva demonstra que o sistema já se encontra próximo do equilíbrio desde as primeiras lavagens, não havendo necessidade de remoção significativa de espécies químicas solúveis.

Gráfico 3. Casca de soja pura – Neutralização do pH.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em estudo realizado por Oladipo; Gazi, (2014), os autores observaram que em condições básicas, ocorre o aumento da quantidade de sítios ativos com carga negativa na superfície do material adsorvente. Esse comportamento também foi reportado por Gupta, Kushwaha e Chattopadhyaya (2016), que verificaram estabilidade do pH em biomateriais não modificados, indicando baixa liberação de compostos solúveis e manutenção das características

superficiais do material. Segundo os autores, essa estabilidade favorece a aplicação do adsorvente em processos de remoção de contaminantes, uma vez que reduz alterações químicas indesejáveis durante o tratamento. Nesse contexto, a estabilidade observada para a CSP sugere que a superfície do material apresenta comportamento químico consistente ao longo das lavagens.

5.4.2 Teor de umidade

O teor de umidade obtido para a amostra de CSM foi de 9,45% enquanto o teor de umidade obtido para a amostra de CSP foi de 1,10%. As massas obtidas para a determinação do teor de umidade estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Resultado da determinação do teor de umidade.

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Teor de Umidade ± desvio padrão
CSM	19,38	17,55	9,45% ± 0,07
CSP	20,02	19,80	1,10% ± 0,07

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O maior teor de umidade observado para a CSM pode estar relacionado às alterações promovidas pelo tratamento com ácido sulfúrico, que favorecem a modificação e a exposição de grupos funcionais polares na superfície da biomassa, aumentando sua afinidade pela água. Em materiais lignocelulósicos, esse comportamento é frequentemente associado às modificações químicas promovidas por tratamentos ácidos, que podem alterar a composição superficial e influenciar suas propriedades hidrofílicas (Foo; Hameed, 2010; Demirbas, 2008). Resultados semelhantes foram observados por Santos (2025), que encontrou teores de umidade de 11,01% e 7,74% para carvões ativados produzidos a partir da casca de pequi pura e modificada, respectivamente, demonstrando que materiais lignocelulósicos apresentam comportamento distinto quanto à retenção de umidade em função do tratamento aplicado.

Em contrapartida, a CSP apresentou menor teor de umidade, indicando menor afinidade pela água quando comparada ao material modificado. A diferença observada entre as amostras evidencia que o tratamento químico promoveu alterações nas características superficiais da biomassa. Entretanto, embora a modificação tenha aumentado a retenção de água, esse comportamento não resultou em maior eficiência de adsorção do azul de metileno. Pelo contrário, os ensaios de adsorção demonstraram desempenho superior da CSP, indicando que o aumento da hidrofilicidade, isoladamente, não foi suficiente para favorecer a interação

entre a superfície adsorvente e o corante nas condições experimentais avaliadas. Além disso, os baixos desvios padrão obtidos (± 0,07%) evidenciam boa reprodutibilidade experimental e adequada precisão nas determinações do teor de umidade, conferindo maior confiabilidade aos resultados obtidos.

5.4.3 Teor de cinzas

Os teores de cinzas obtidos para as amostras de CSM foram respectivamente 0,249%, 0,523% e 0,588%, seguindo a metodologia oficial de análise AOAC (2000), enquanto as amostras de CSP apresentaram valores de 2,99%, 3,49% e 3,49%. A diferença observada entre os materiais evidencia que o processo de modificação promoveu uma redução significativa do conteúdo de matéria inorgânica presente na biomassa. A Tabela 6 apresenta as massas obtidas antes e após a calcinação da CSM, bem como os respectivos teores de cinzas, enquanto a Tabela 7 apresenta os resultados correspondentes para a CSP.

Tabela 6. Resultados da determinação do teor de cinzas para casca de soja modificada.

CSM				
Peso do Cadinho (g)	**Peso da Amostra (g)**	**Massa total antes da calcinação (g)**	**Massa total após calcinação (g)**	**Teor de cinzas (%)**
48,00	2,00	50,00	48,00	0,249
50,69	2,00	52,69	50,70	0,523
45,94	2,00	47,94	45,958	0,588

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 7. Resultados da determinação do teor de cinzas para casca de soja pura.

CSP				
Peso do Cadinho (g)	**Peso da Amostra (g)**	**Massa total antes da calcinação (g)**	**Massa total após calcinação (g)**	**Teor de cinzas (%)**
26,68	2,00	28,68	26,74	2,99
24,28	2,00	26,28	24,35	3,49
26,06	2,00	28,06	26,13	3,49

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A redução do teor de cinzas após a modificação química sugere a remoção de parte dos constituintes minerais presentes na biomassa original. Segundo Foo e Hameed (2010), a presença de frações minerais pode influenciar as propriedades superficiais dos adsorventes, afetando a disponibilidade de sítios ativos e o desempenho do processo adsortivo.

O teor de cinzas está diretamente relacionado à quantidade de resíduos minerais remanescentes após a calcinação do material, sendo utilizado como um importante indicador da composição inorgânica do adsorvente. De modo geral, elevados teores de cinzas podem contribuir para a obstrução parcial de poros e para a redução da área superficial disponível para adsorção, comprometendo a interação entre adsorvente e adsorbato (Foo; Hameed, 2010).

A menor quantidade de cinzas observada para a CSM sugere que o tratamento químico foi capaz de remover parte dos constituintes minerais presentes na biomassa original, resultando em alterações na superfície do material. Em princípio, esse comportamento pode favorecer a exposição de grupos funcionais potencialmente envolvidos no processo de adsorção (Crini, 2006). Entretanto, os resultados obtidos neste estudo demonstraram que essa modificação não promoveu aumento da eficiência de remoção do azul de metileno, indicando que a redução do teor de cinzas, isoladamente, não foi suficiente para melhorar o desempenho adsortivo da biomassa.

Embora a CSP tenha apresentado teor de cinzas superior ao da CSM, ambos os materiais apresentaram valores compatíveis com aqueles reportados para adsorventes lignocelulósicos utilizados em processos de adsorção (Santos, 2025). Dessa forma, os resultados indicam que outros fatores, como as alterações químicas e estruturais promovidas pelo tratamento ácido, exerceram influência mais significativa sobre a adsorção do azul de metileno do que o teor de cinzas isoladamente.

5.5 Avaliação dos Ensaios de Adsorção

A Tabela 8 apresenta os valores das médias das absorbâncias ao longo do tempo de contato.

A avaliação da adsorção em função do tempo permitiu investigar a cinética do processo e determinar o período necessário para a aproximação do equilíbrio adsortivo. Nos primeiros minutos de contato, observou-se elevada eficiência na remoção do azul de metileno, atribuída à ampla disponibilidade de sítios de interação na superfície da casca de soja.

Com o aumento do tempo de contato, a taxa de remoção diminuiu gradativamente em decorrência da ocupação progressiva desses sítios, reduzindo a quantidade de locais disponíveis para retenção das moléculas do corante. Esse comportamento é típico de materiais

lignocelulósicos, nos quais a adsorção ocorre de forma mais intensa nas etapas iniciais e tende à estabilização à medida que a superfície se aproxima da saturação.

A estabilização observada nos maiores tempos de contato sugere o estabelecimento do equilíbrio do sistema, condição em que as velocidades de adsorção e dessorção tornam-se semelhantes. Esses resultados evidenciam a eficiência da casca de soja na remoção do azul de metileno e permitem compreender os mecanismos envolvidos nesse processo.

Para uma interpretação mais abrangente dos fenômenos observados, os dados experimentais foram analisados com base nos modelos teóricos de Langmuir e Freundlich, amplamente empregados na descrição de sistemas adsortivos. O modelo de Langmuir considera a retenção do adsorbato em monocamada sobre sítios energeticamente equivalentes, enquanto o modelo de Freundlich descreve superfícies heterogêneas, contendo regiões com diferentes energias de interação.

Os modelos de Langmuir e Freundlich foram empregados para descrever o comportamento adsortivo do azul de metileno sobre a superfície da casca de soja. O ajuste dos dados experimentais permitiu avaliar tanto a possibilidade de adsorção em monocamada quanto a heterogeneidade energética da superfície do adsorvente.

Os ajustes obtidos indicaram boa concordância entre os resultados experimentais e os modelos avaliados, demonstrando a afinidade do azul de metileno pela biomassa estudada. O comportamento observado sugere que a remoção do corante ocorre por meio da ocupação progressiva dos sítios ativos disponíveis, ao mesmo tempo em que reflete a heterogeneidade característica da estrutura lignocelulósica da casca de soja.

Considerando a natureza lignocelulósica da casca de soja, composta por celulose, hemicelulose e lignina, é esperado que a superfície apresente sítios ativos com diferentes energias de adsorção. Dessa forma, os resultados obtidos podem ser associados à presença de múltiplos mecanismos de interação entre o corante e a biomassa, incluindo interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio e forças de van der Waals.

A modificação química com ácido sulfúrico promoveu alterações superficiais que favoreceram a disponibilidade de sítios ativos, justificando a capacidade adsortiva observada para o material modificado.

Dessa forma, a análise dos parâmetros de equilíbrio reforça o potencial desse resíduo agroindustrial como adsorvente alternativo para aplicação em processos de tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e de baixo custo para o controle da poluição hídrica.

Tabela 8. Dados experimentais da adsorção de azul de metileno da casca de soja pura.

Tempo (min)	Média das adsorções	Desvio Padrão
0	2,46	0,1846
5	1,28	0,1815
10	0,50	0,0489
20	0,21	0,0206
30	0,11	0,0013
60	0,09	0,0095
90	0,06	0,0059

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No tempo inicial (0 min), a absorbância média foi de aproximadamente 2,46, reduzindo para 0,06 após 90 minutos. Essa diminuição expressiva evidencia a eficiência da CSP na remoção do corante.

Nos primeiros 10 minutos, verifica-se uma queda acentuada na absorbância, passando de 2,46 para 0,50, o que caracteriza uma etapa inicial rápida de adsorção. Esse comportamento pode ser atribuído à maior disponibilidade de sítios ativos na superfície do adsorvente.

A partir de 20 minutos, a redução da absorbância torna-se menos pronunciada, indicando a diminuição da taxa de adsorção e a aproximação do equilíbrio do sistema.

Os parâmetros dos modelos de Freundlich e Langmuir obtidos para a CSP estão apresentados na Tabela 9. Esses modelos foram utilizados para descrever o equilíbrio de adsorção do azul de metileno e compreender os mecanismos envolvidos na interação entre o corante e a superfície adsorvente. A análise dos dados experimentais permitiu avaliar tanto a heterogeneidade da biomassa quanto a afinidade do adsorvato pelos sítios ativos disponíveis.

Tabela 9. Parâmetros dos modelos de adsorção – casca de soja pura

Modelo	Equação	R^2
Freundlich	y = 0,3133x – 0,2896	0,9809
Langmuir	y = 0,9255x + 0,9835	0,9875

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O modelo de Freundlich apresentou coeficiente de determinação (R^2 = 0,9809), evidenciando excelente ajuste aos dados experimentais. O valor de 1/n igual a 0,3133 resultou em n = 3,19, indicando que o processo ocorreu de forma favorável. Valores de n compreendidos entre 1 e 10 são geralmente associados a elevada afinidade entre adsorvente e adsorvato, sugerindo forte interação do azul de metileno com os grupos funcionais presentes na superfície da biomassa. Esse comportamento está relacionado à natureza heterogênea da casca de soja, constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes que proporcionam sítios de adsorção com diferentes energias (Freundlich, 1906).

A constante de Freundlich (KF = 0,51 mg g^{-1} (L $mg^{-1})^{1/n}$) representa a capacidade adsortiva do material e confirma o potencial da biomassa para remoção de corantes catiônicos em meio aquoso. Embora apresente capacidade moderada, o resultado demonstra a viabilidade da utilização da casca de soja como adsorvente alternativo de baixo custo para aplicações ambientais.

O ajuste ao modelo de Langmuir apresentou coeficiente de determinação ligeiramente superior (R^2 = 0,9875), indicando melhor representação do comportamento experimental. Esse resultado sugere que a adsorção ocorre com uma ligeira superioridade por formação de monocamada sobre sítios ativos energeticamente equivalentes, conforme os pressupostos do modelo. A capacidade máxima de adsorção estimada (qmax = 1,08 mg g^{-1}) corresponde à quantidade máxima teórica de azul de metileno que pode ser retida por unidade de massa do adsorvente, enquanto a constante de Langmuir (KL = 0,94 L mg^{-1}) indica elevada afinidade entre o corante e a superfície da casca de soja.

Os elevados coeficientes de determinação obtidos para os modelos de Langmuir (R^2 = 0,9875) e Freundlich (R^2 = 0,9809) indicam que ambos foram capazes de representar satisfatoriamente os dados experimentais. O ajuste ligeiramente superior ao modelo de Langmuir sugere predominância da adsorção em monocamada, enquanto o bom ajuste ao modelo de Freundlich evidencia a heterogeneidade característica da superfície lignocelulósica da casca de soja.

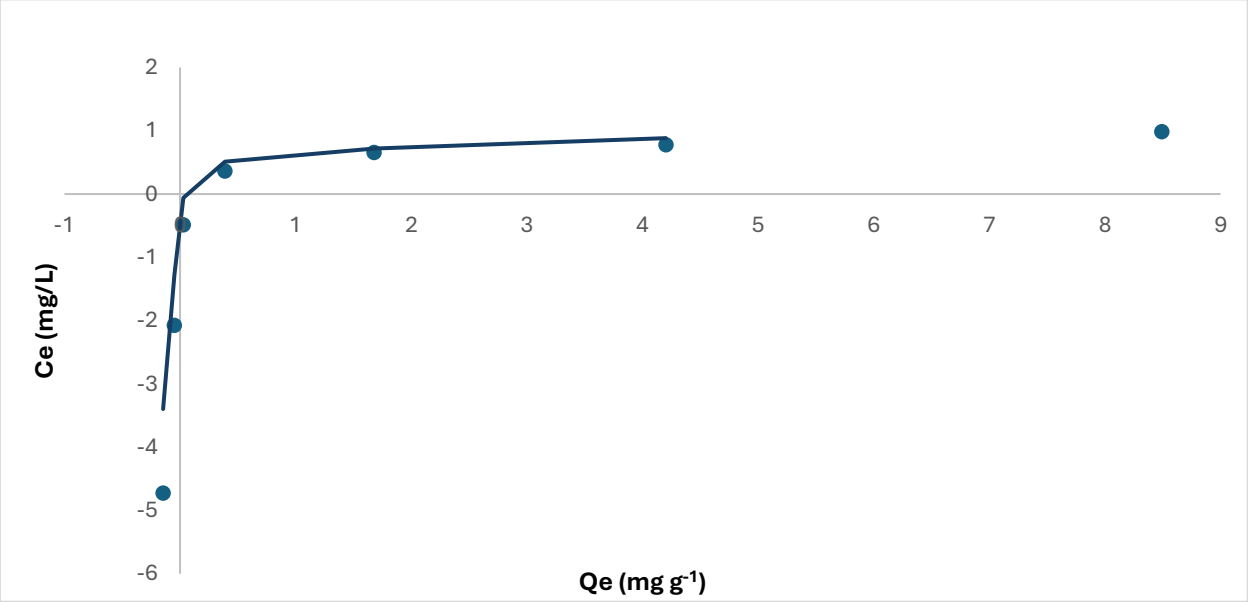
A favorabilidade do processo foi confirmada pelo fator de separação (RL = 0,041), cujo valor se encontra na faixa de $0 < RL < 1$, característica de sistemas adsortivos favoráveis. Esse resultado demonstra que a remoção do azul de metileno ocorre de maneira eficiente dentro das condições avaliadas, evidenciando a espontaneidade e a viabilidade do processo.

A comparação entre os modelos revela que ambos descreveram adequadamente o comportamento experimental, fornecendo informações complementares sobre o mecanismo de adsorção. Enquanto o modelo de Langmuir sugere predominância da formação de

monocamada, o excelente ajuste obtido pelo modelo de Freundlich indica que a superfície do adsorvente não é completamente homogênea, característica típica de resíduos agroindustriais lignocelulósicos. Dessa forma, os resultados demonstram que a adsorção do azul de metileno pela CSP envolve tanto a ocupação progressiva de sítios ativos quanto a influência da heterogeneidade estrutural da biomassa, confirmando seu potencial para aplicação em processos de tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos.

A representação gráfica dos dados de adsorção permite uma melhor visualização do comportamento do sistema. O Gráfico 4 apresenta a isoterma de adsorção, relacionando a quantidade adsorvida (Qe) com a concentração de equilíbrio (Ce).

Gráfico 4. Isoterma de Adsorção – Casca de Soja Pura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se, no Gráfico 4, que a relação entre a quantidade adsorvida (Qe) e a concentração de equilíbrio (Ce) apresenta um aumento inicial, seguido de uma tendência à estabilização, indicando a aproximação da saturação dos sítios ativos do adsorvente.

Nos valores iniciais de concentração, verifica-se um aumento mais acentuado na quantidade adsorvida, o que está associado à maior disponibilidade de sítios ativos na superfície da casca de soja. À medida que esses sítios vão sendo ocupados, a taxa de adsorção diminui, resultando em um comportamento tendente ao equilíbrio.

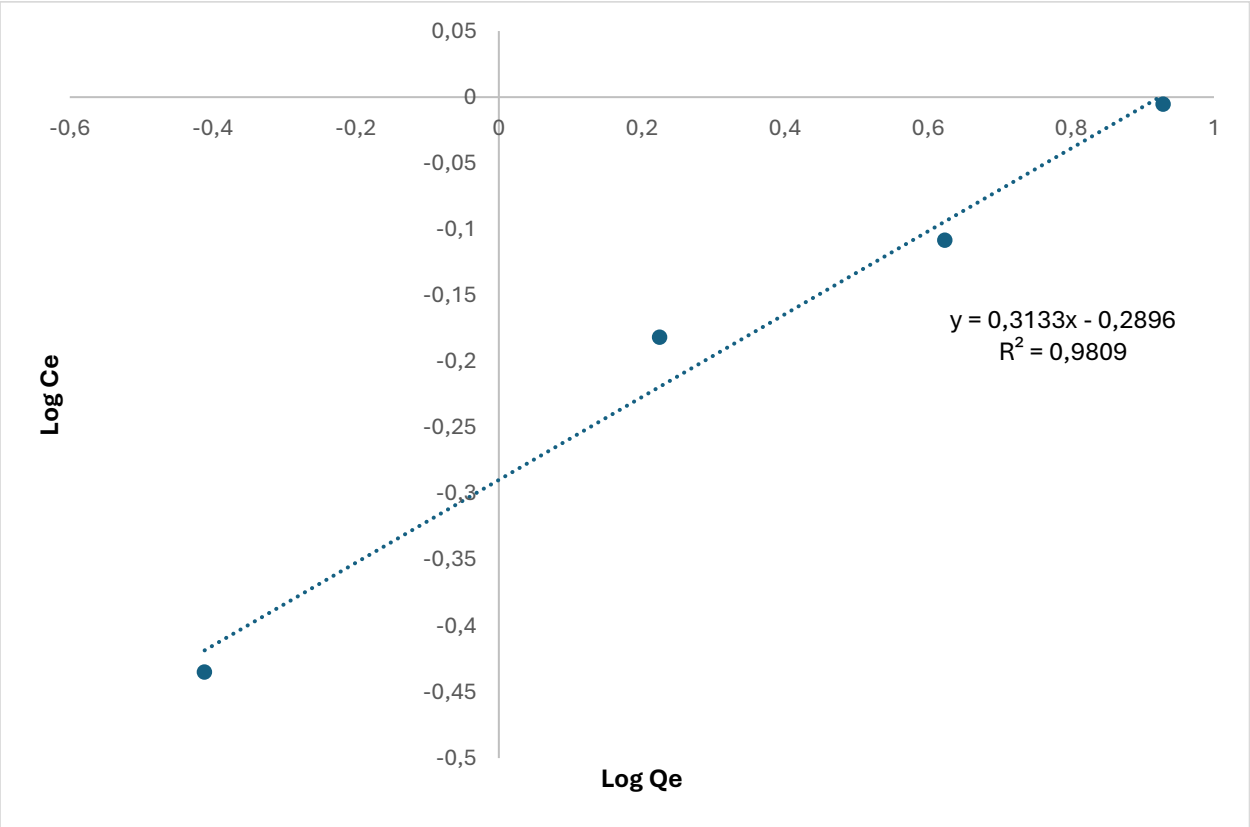
Entretanto, observa-se a presença de valores negativos de concentração de equilíbrio (Ce) em determinados pontos do gráfico, o que não possui significado físico no processo de

adsorção. Esse comportamento pode estar relacionado a limitações experimentais, como erros na leitura de absorbância, imprecisões na curva de calibração ou propagação de erros nos cálculos.

Apesar dessas inconsistências pontuais, a tendência geral do gráfico indica que o material apresenta capacidade de adsorção, com indícios de saturação dos sítios ativos em maiores valores de concentração. Com base nos dados obtidos na isoterma de adsorção, foram aplicados modelos matemáticos com o objetivo de descrever o comportamento do processo e melhor compreender o mecanismo de adsorção.

O Gráfico 5 apresenta a linearização dos dados experimentais segundo o modelo de Freundlich, expressa pela relação entre log Qe e log Ce.

Gráfico 5. Isoterma de Freundlich – Casca de Soja Pura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

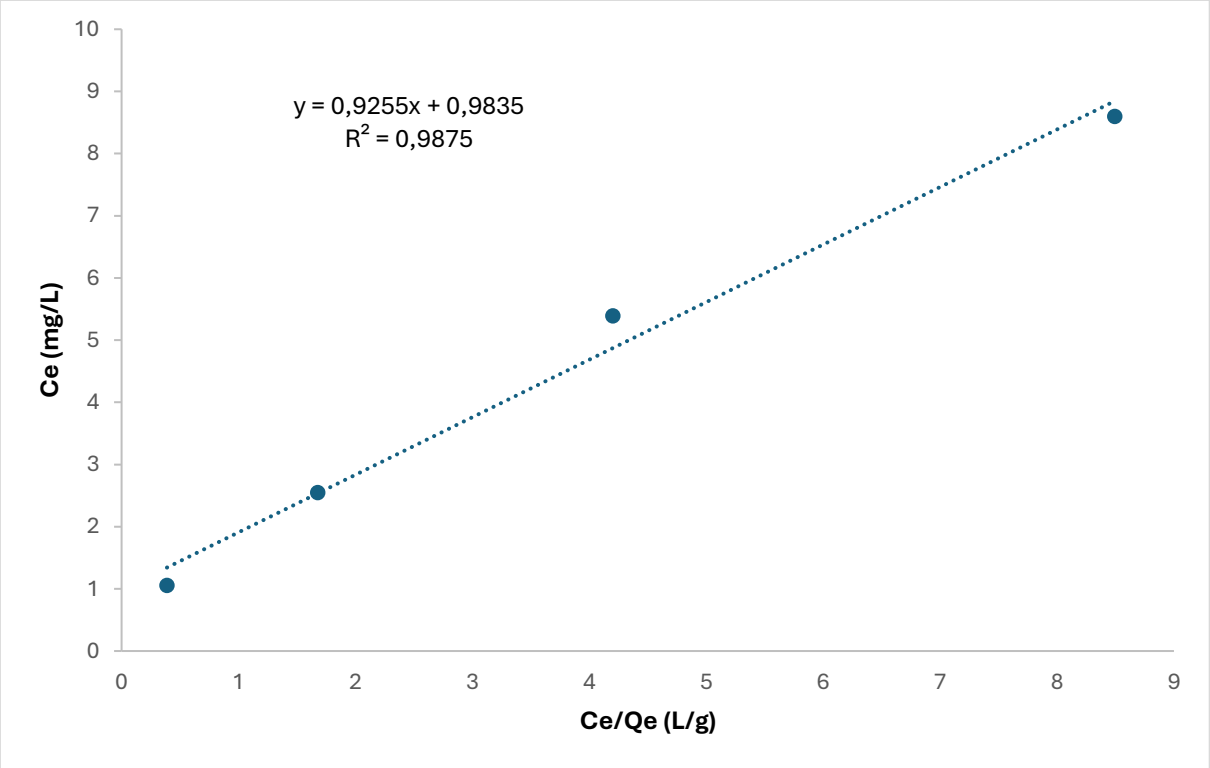
Observa-se que os pontos experimentais apresentam boa distribuição ao longo da reta ajustada, indicando que o modelo descreve adequadamente o processo de adsorção. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9809$) confirma o excelente ajuste do modelo aos dados obtidos.

O modelo de Freundlich é aplicável a superfícies heterogêneas e considera a possibilidade de formação de multicamadas adsorvidas. Dessa forma, o bom ajuste observado sugere que a adsorção do azul de metileno pela CSP ocorre em diferentes níveis de energia de adsorção.

O coeficiente angular da reta (1/n = 0,3133) está relacionado à intensidade do processo de adsorção. Como esse valor é inferior a 1, indica que a adsorção é favorável, sugerindo boa interação entre o adsorvato e o adsorvente.

Além disso, o valor do intercepto (log Kf) está associado à capacidade de adsorção do material, reforçando o potencial da CSP como adsorvente para remoção do corante. Além do modelo de Freundlich, os dados experimentais também foram ajustados ao modelo de Langmuir, cuja linearização está apresentada no Gráfico 6.

Gráfico 6. Isoterma de Langmuir – Casca de Soja Pura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O Gráfico 6 apresenta a linearização dos dados experimentais segundo o modelo de Langmuir, que relaciona a razão entre a concentração de equilíbrio e a quantidade adsorvida (Ce/Qe) em função da concentração de equilíbrio (Ce).

Observa-se que os pontos experimentais apresentaram boa linearidade em relação à reta ajustada, indicando que o modelo de Langmuir descreve adequadamente o processo de

adsorção. O coeficiente de determinação obtido ($R^2 = 0,9875$) confirma o excelente ajuste do modelo aos dados experimentais.

O modelo de Langmuir assume a formação de uma monocamada de adsorvato sobre a superfície do adsorvente, em sítios homogêneos e com energia de adsorção uniforme. Dessa forma, o bom ajuste observado sugere que o processo de adsorção do azul de metileno pela CSP ocorre ligeiramente por formação de monocamada.

A partir da equação da reta ($y = 0,9255x + 0,9835$), é possível determinar a capacidade máxima de adsorção e a constante de Langmuir, que estão diretamente relacionados à afinidade entre o corante e o material adsorvente.

De forma geral, tanto o modelo de Freundlich quanto o modelo de Langmuir apresentaram elevados coeficientes de determinação, indicando bom ajuste aos dados experimentais. Ambos apresentaram excelente ajuste com ligeira superioridade ao modelo de Langmuir, sugerindo que a adsorção ocorre por formação de monocamada.

Por outro lado, o bom ajuste do modelo de Freundlich também indica a presença de heterogeneidade na superfície da casca de soja, característica típica de materiais lignocelulósicos. Assim, pode-se inferir que o processo de adsorção envolve tanto características de superfície heterogênea quanto a formação de monocamadas, dependendo das condições do sistema.

Após a análise dos resultados obtidos para a CSP, procedeu-se à avaliação do desempenho da CSM, com o objetivo de verificar a influência da modificação química no processo de adsorção. Os dados experimentais obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Dados experimentais da adsorção de azul de metileno utilizando casca de soja modificada.

Tempo (min)	Média	Desvio Padrão
0	2,65	0,02
5	1,91	0,06
10	1,05	0,02
20	0,56	0,02
30	0,35	0,04
60	0,24	0,05
90	0,15	0,03

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 10 apresenta os valores de absorbância obtidos ao longo do tempo de contato para a CSM, bem como as médias e desvios padrão calculados a partir dos ensaios em duplicata.

A redução da absorbância ao longo do tempo evidencia a remoção do azul de metileno pela superfície adsorvente da casca de soja. Esse comportamento é característico de processos adsortivos em materiais lignocelulósicos, nos quais a elevada disponibilidade inicial de sítios ativos favorece uma rápida captura das moléculas do corante.

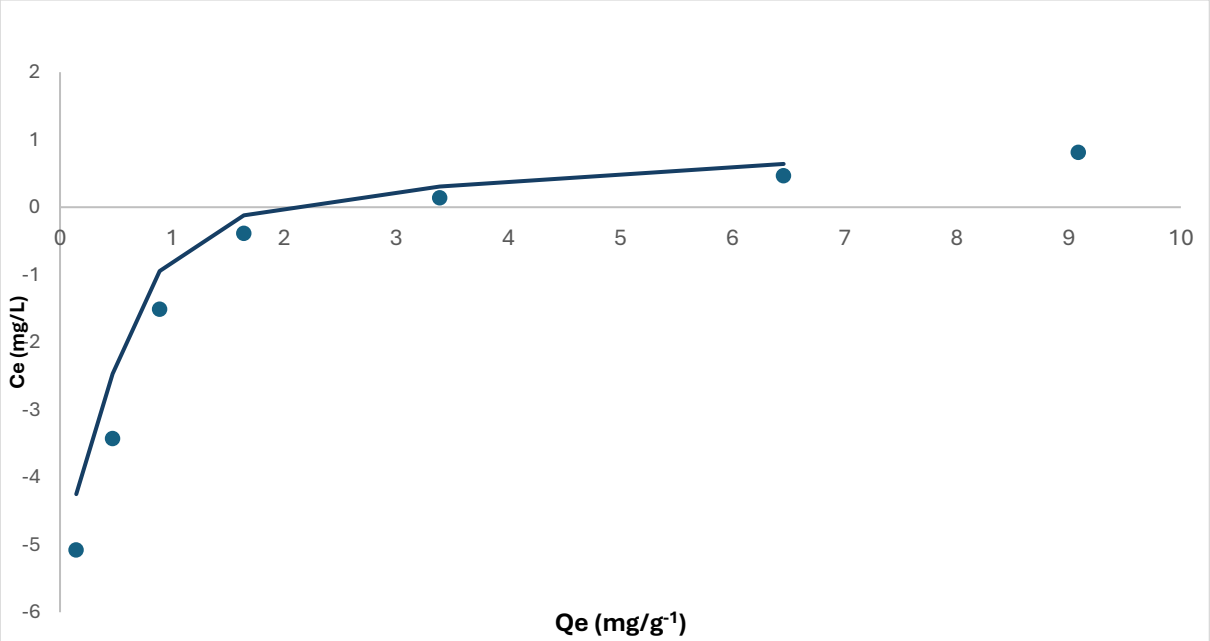
Comparando-se com os resultados obtidos para a CSP, verifica-se que a CSM apresentou valores de absorbância superiores ao longo do experimento, indicando menor eficiência de remoção do corante nas condições avaliadas.

Nos primeiros 10 minutos, também é possível observar uma redução significativa da absorbância, passando de 2,65 para 1,05, o que demonstra a ocorrência de uma etapa inicial rápida de adsorção. Entretanto, a redução ocorre de forma menos acentuada quando comparada ao material não modificado.

A partir de 20 minutos, a diminuição da absorbância torna-se mais gradual, indicando a aproximação do equilíbrio do sistema e a ocupação progressiva dos sítios ativos do adsorvente. Os valores de desvio padrão observados são baixos, indicando boa reprodutibilidade experimental e confiabilidade dos dados obtidos.

Os dados apresentados na Tabela 10 podem ser visualizados no Gráfico 7, que mostra a isoterma de adsorção para a CSM, relacionando a quantidade adsorvida (Qe) com a concentração de equilíbrio (Ce).

Gráfico 7. Isoterma de Adsorção – Casca de Soja Modificada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se, no Gráfico 7, que a relação entre a quantidade adsorvida (Qe) e a concentração de equilíbrio (Ce) apresenta um aumento inicial seguido de uma tendência à estabilização, indicando a aproximação da saturação dos sítios ativos do adsorvente. À medida que esses sítios vão sendo ocupados, a taxa de adsorção diminui, resultando em um comportamento tendente ao equilíbrio.

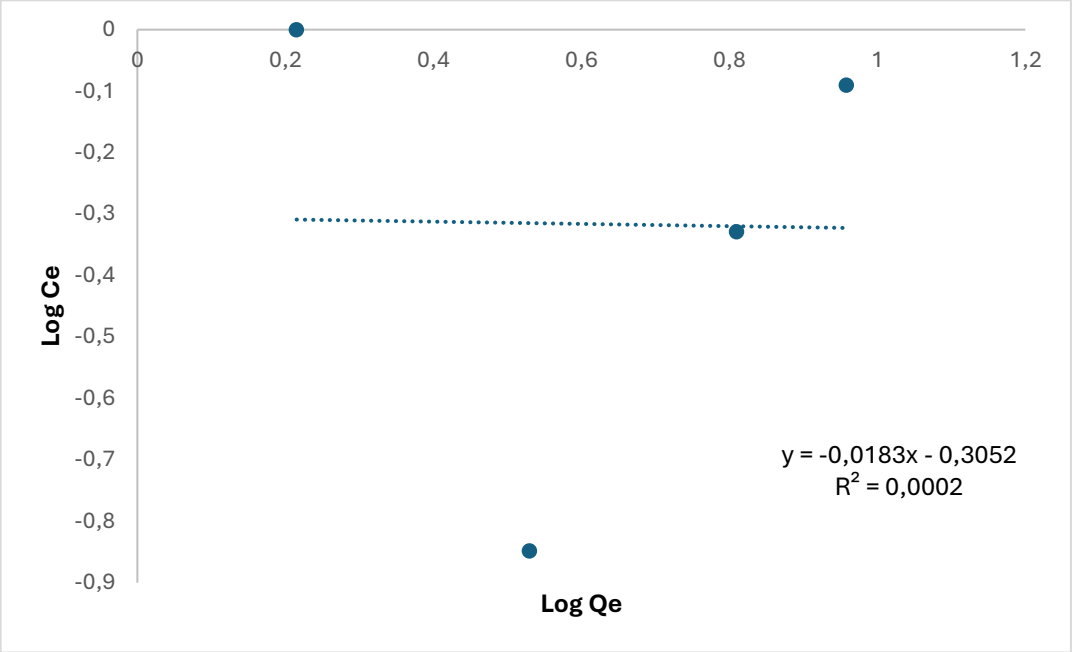
Entretanto, assim como observado para a CSP, nota-se a presença de valores negativos de concentração de equilíbrio (Ce) em alguns pontos do gráfico, os quais não possuem significado físico no contexto da adsorção. Esses resultados podem estar associados a limitações experimentais, como imprecisões na leitura de absorbância ou na aplicação da curva de calibração.

Além disso, quando comparado ao material não modificado, observa-se que a CSM apresenta menores valores de quantidade adsorvida, indicando uma menor eficiência no processo de remoção do corante nas condições avaliadas.

Diferentemente do esperado, a modificação química com ácido sulfúrico não promoveu aumento da capacidade adsortiva da casca de soja. Em todas as condições avaliadas, a CSM apresentou valores de absorbância residual superiores aos observados para a CSP, indicando menor eficiência de remoção do azul de metileno.

A partir dos dados obtidos na isoterma de adsorção, foram aplicados modelos matemáticos com o objetivo de descrever o comportamento do sistema. O Gráfico 8 apresenta a linearização dos dados segundo o modelo de Freundlich para a CSM.

Gráfico 8. Isoterma de Freundlich – Casca de Soja Modificada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se que os pontos experimentais não apresentam boa correlação linear, estando distribuídos de forma bastante dispersa em relação à reta ajustada. Esse comportamento é confirmado pelo coeficiente de determinação extremamente baixo ($R^2 = 0,0002$), indicando que o modelo de Freundlich não representa adequadamente os dados experimentais obtidos.

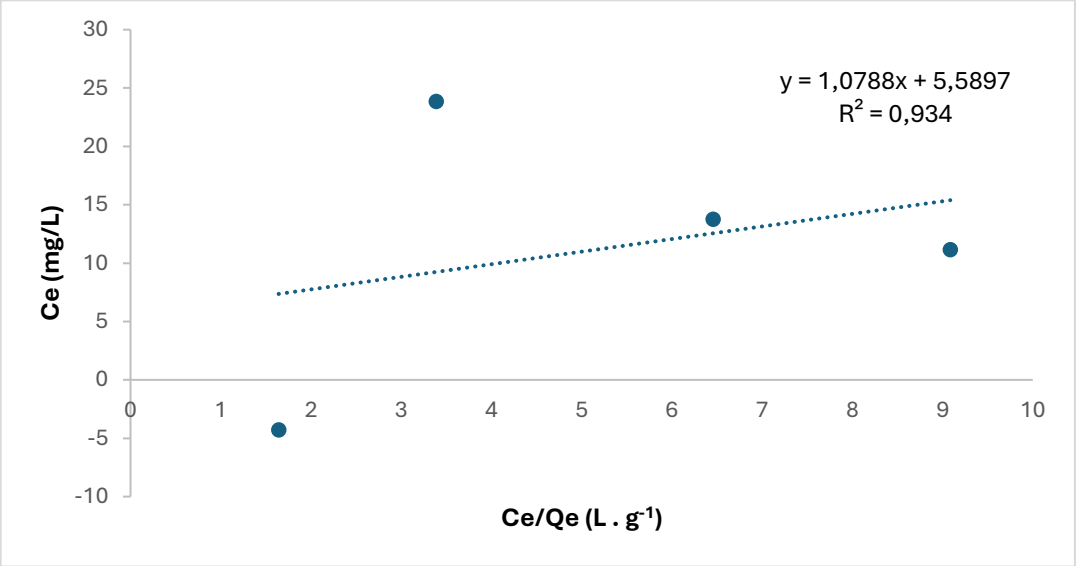
O coeficiente angular da reta ($1/n = -0,0183$) apresenta valor negativo, o que não possui significado físico no contexto da adsorção, visto que esse parâmetro está relacionado à intensidade do processo adsortivo e deve assumir valores positivos para sistemas favoráveis.

Esses resultados sugerem que o modelo de Freundlich não é adequado para descrever o processo de adsorção do azul de metileno utilizando a CSM nas condições avaliadas. A falta de ajuste pode estar associada a limitações experimentais, à dispersão dos dados ou às alterações estruturais promovidas pela modificação do adsorvente.

Além disso, quando comparado ao desempenho observado para a CSP, que apresentou excelente ajuste ao modelo de Freundlich ($R^2 = 0,9809$), evidencia-se uma diferença significativa no comportamento adsortivo, indicando que a modificação do material influenciou negativamente a interação entre o adsorvente e o corante.

Diante do baixo ajuste do modelo de Freundlich, torna-se necessário avaliar outros modelos que possam descrever de forma mais adequada o processo de adsorção. Nesse contexto, os dados experimentais foram ajustados ao modelo de Langmuir, cuja linearização está apresentada no Gráfico 9.

Gráfico 9. Isoterma de Langmuir – Casca de soja Modificada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O Gráfico 9 apresenta a linearização dos dados experimentais segundo o modelo de Langmuir para a CSM, relacionando a razão entre a concentração de equilíbrio e a quantidade adsorvida (Ce/Qe) com a concentração de equilíbrio (Ce).

Observa-se que os pontos experimentais se encontram bastante dispersos em relação à reta ajustada, indicando baixa correlação linear entre as variáveis. Esse comportamento é confirmado pelo coeficiente de determinação obtido ($R^2 = 0,934$), o qual é significativamente inferior ao observado para a CSP.

O modelo de Langmuir apresentou coeficiente de determinação de 0,934, indicando ajuste satisfatório aos dados experimentais. Entretanto, esse valor foi inferior ao obtido para a CSP (0,9875), sugerindo que a modificação química reduziu a previsibilidade do comportamento adsortivo do sistema.

É possível observar a presença de pontos com valores inconsistentes, como concentrações de equilíbrio elevadas e até valores negativos, o que não possui significado físico no contexto da adsorção. Esses resultados podem estar associados a limitações experimentais, erros na determinação das concentrações ou inconsistências nos cálculos.

Quando comparado com a CSP, que apresentou excelente ajuste ao modelo de Langmuir ($R^2 = 0,9875$), fica evidente que a modificação química realizada no material influenciou negativamente o comportamento adsortivo, reduzindo a capacidade de ajuste aos modelos teóricos e, consequentemente, a previsibilidade do processo.

Os resultados obtidos neste trabalho diferem daqueles reportados por Brandão (2020), citado por Santos (2025), que observou eficiência de remoção de 86,93% para o azul de metileno utilizando carvão ativado produzido a partir da casca de pequi modificada com hidróxido de sódio (NaOH). Segundo o autor, a modificação química promoveu alterações superficiais capazes de favorecer a adsorção do corante, aumentando a disponibilidade de sítios ativos e as interações entre adsorvente e adsorbato.

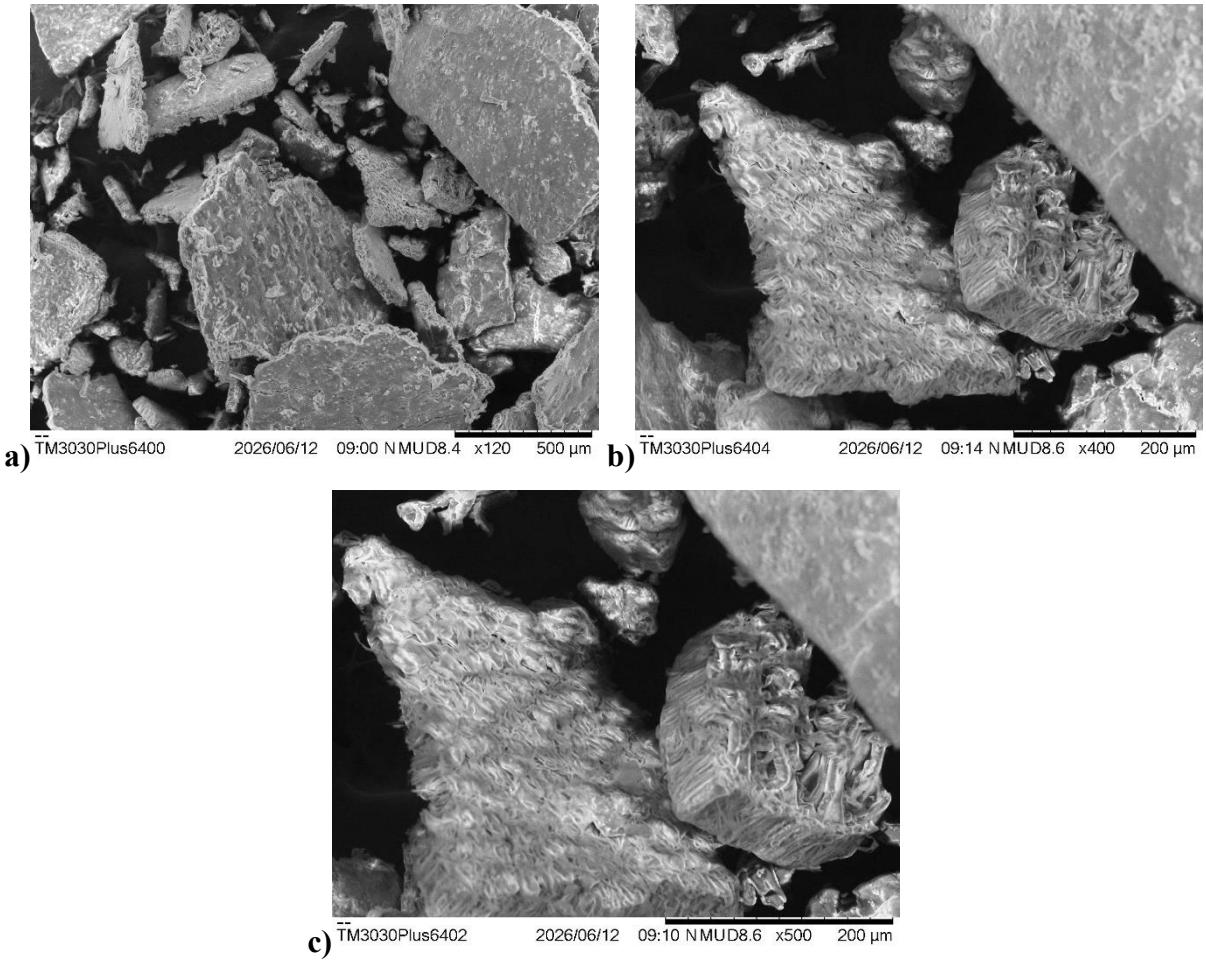
Entretanto, no presente estudo, a CSM apresentou desempenho inferior ao material puro, evidenciado pelos maiores valores de absorbância residual ao longo do tempo e pelo baixo ajuste aos modelos de Freundlich e Langmuir. Esse comportamento sugere que o tratamento químico empregado pode ter promovido alterações estruturais desfavoráveis à adsorção do azul de metileno, como a remoção de grupos funcionais importantes para a interação com o corante, bloqueio parcial dos poros ou redução da acessibilidade aos sítios ativos.

Além disso, a superioridade da CSP em relação à CSM indica que a biomassa natural já apresenta características superficiais adequadas para a remoção do azul de metileno, dispensando, nas condições avaliadas, a necessidade de modificação química. Dessa forma, os resultados demonstram que a eficiência do tratamento químico depende não apenas do reagente utilizado, mas também das características intrínsecas da biomassa empregada e das condições experimentais adotadas.

5.6 Resultados da Análise Morfológica (MEV)

A morfologia superficial da CSP foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com o objetivo de investigar características estruturais que possam influenciar o processo de adsorção do azul de metileno. As micrografias obtidas em diferentes ampliações estão apresentadas na Figura 9.

Figura 9. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da casca de soja pura nas ampliações de (a) 120x, (b) 400x e (c) 500x.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

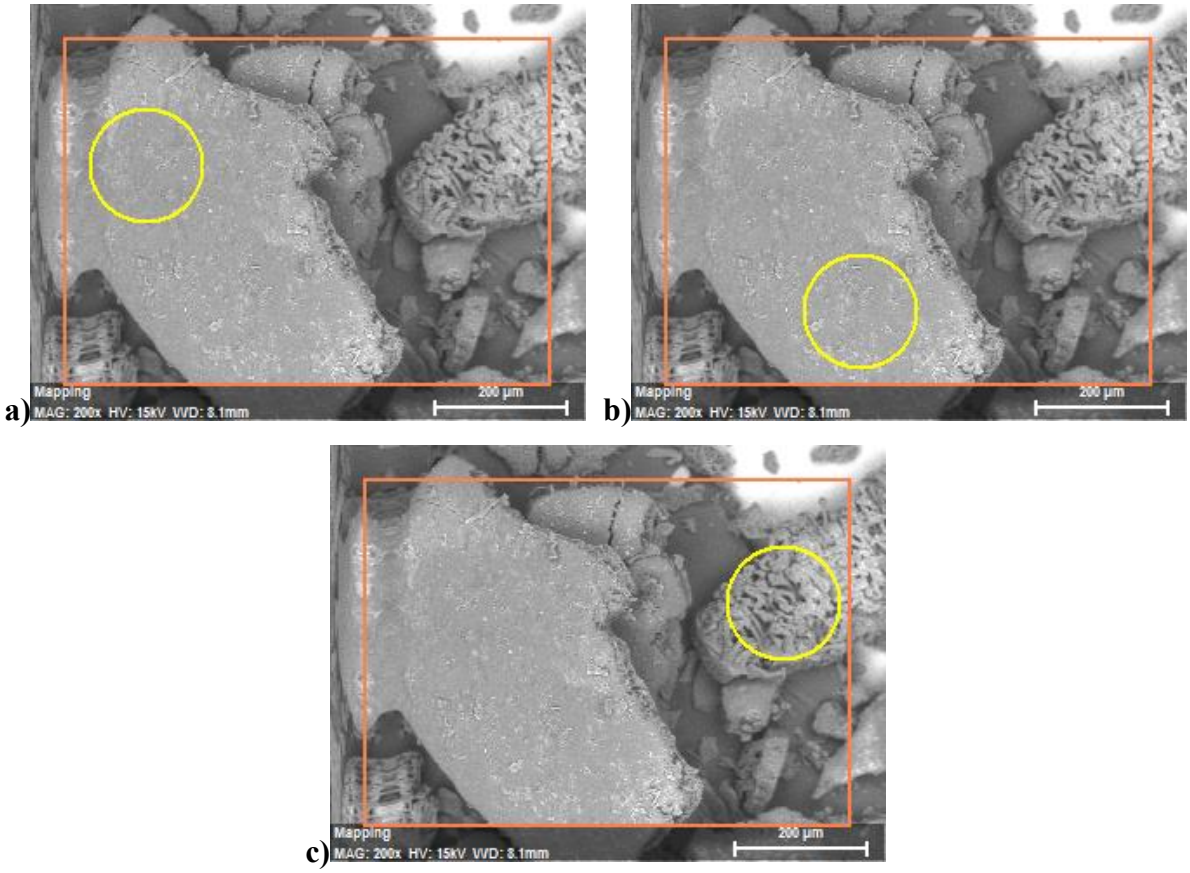
Conforme observado na Figura 9, a CSP apresenta morfologia heterogênea, composta por partículas de diferentes tamanhos e formatos irregulares. Na ampliação de 120x (Figura 9a), observa-se a presença de fragmentos com superfícies relativamente compactas e bordas fraturadas, além de espaços vazios entre as partículas.

Nas ampliações de 400x e 500x (Figuras 9b e 9c), verifica-se com maior clareza a presença de estruturas fibrosas, rugosidades e cavidades superficiais distribuídas ao longo do material. Essas características são típicas de biomateriais lignocelulósicos e podem favorecer o processo de adsorção ao aumentar a área de contato entre o adsorvente e o adsorbato.

A presença de irregularidades morfológicas e regiões fibrilares sugere uma superfície potencialmente favorável à interação com as moléculas de azul de metileno. Esse comportamento está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de adsorção, nos quais a CSP apresentou elevada eficiência na remoção do corante ao longo do tempo de contato.

Para complementar a caracterização morfológica, realizou-se a análise de EDX da CSP, com a finalidade de identificar a composição elementar superficial do material. Os espectros obtidos em três pontos distintos da amostra são apresentados na Figura 10, enquanto os valores quantitativos correspondentes são apresentados na Tabela 11.

Figura 10. Espectros de EDX da casca de soja pura obtidos em diferentes pontos de análise: (a) ponto 1, (b) ponto 2 e (c) ponto 3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 11. Composição elementar da casca de soja pura obtida por EDX.

Ponto Analisado	Carbono (% massa)	Oxigênio (% massa)	Carbono (% atômica)	Oxigênio (% atômica)
Ponto 1	52,42	47,58	59,47	40,53
Ponto 2	50,71	49,29	57,81	42,19
Ponto 3	52,77	47,23	59,81	40,19
Média	51,97	48,03	59,03	40,97

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

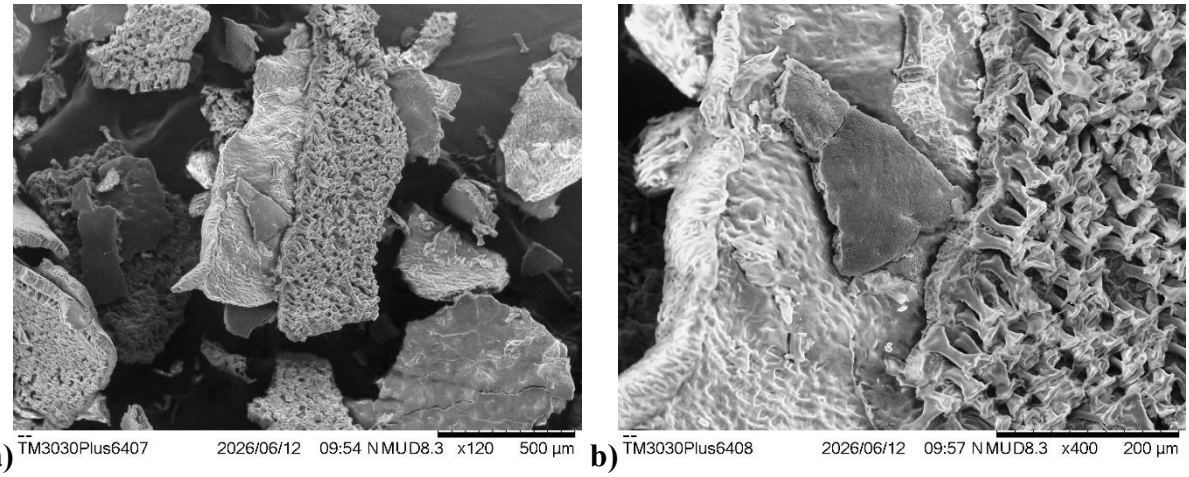
A quantificação elementar por EDX da CSP indicou a presença majoritária de carbono e oxigênio, com valores médios de 51,97% e 48,03% em massa, respectivamente. Observa-se que os três pontos analisados apresentaram pequena variação entre si, indicando relativa homogeneidade da composição elementar superficial da CSP. O teor de carbono variou de 50,71% a 52,77%, enquanto o teor de oxigênio variou de 47,23% a 49,29%.

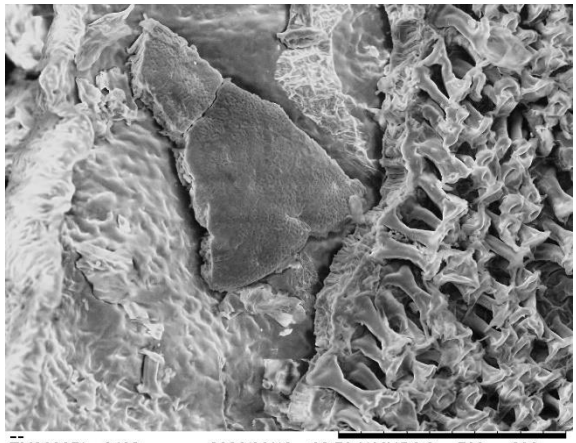
A predominância desses elementos é coerente com a composição típica de materiais lignocelulósicos, uma vez que a casca de soja é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Além disso, a elevada presença de oxigênio sugere a ocorrência de estruturas químicas oxigenadas características de materiais lignocelulósicos. Esses grupos podem atuar como sítios ativos para interação com as moléculas de azul de metileno, favorecendo o processo de adsorção.

Dessa forma, os resultados de EDX complementam as observações obtidas por MEV, evidenciando que a CSP apresenta superfície irregular e composição química compatível com biomateriais de origem vegetal. A associação entre rugosidade, cavidades superficiais e presença de grupos oxigenados contribui para justificar o desempenho da CSP como adsorvente alternativo na remoção do azul de metileno.

Após a caracterização da CSP, realizou-se a análise morfológica da CSM, com o objetivo de verificar possíveis alterações estruturais decorrentes do processo de modificação e sua influência nas características superficiais do adsorvente.

Figura 11. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da casca de soja modificada nas ampliações de (a) 120x, (b) 400x e (c) 500x.





c)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

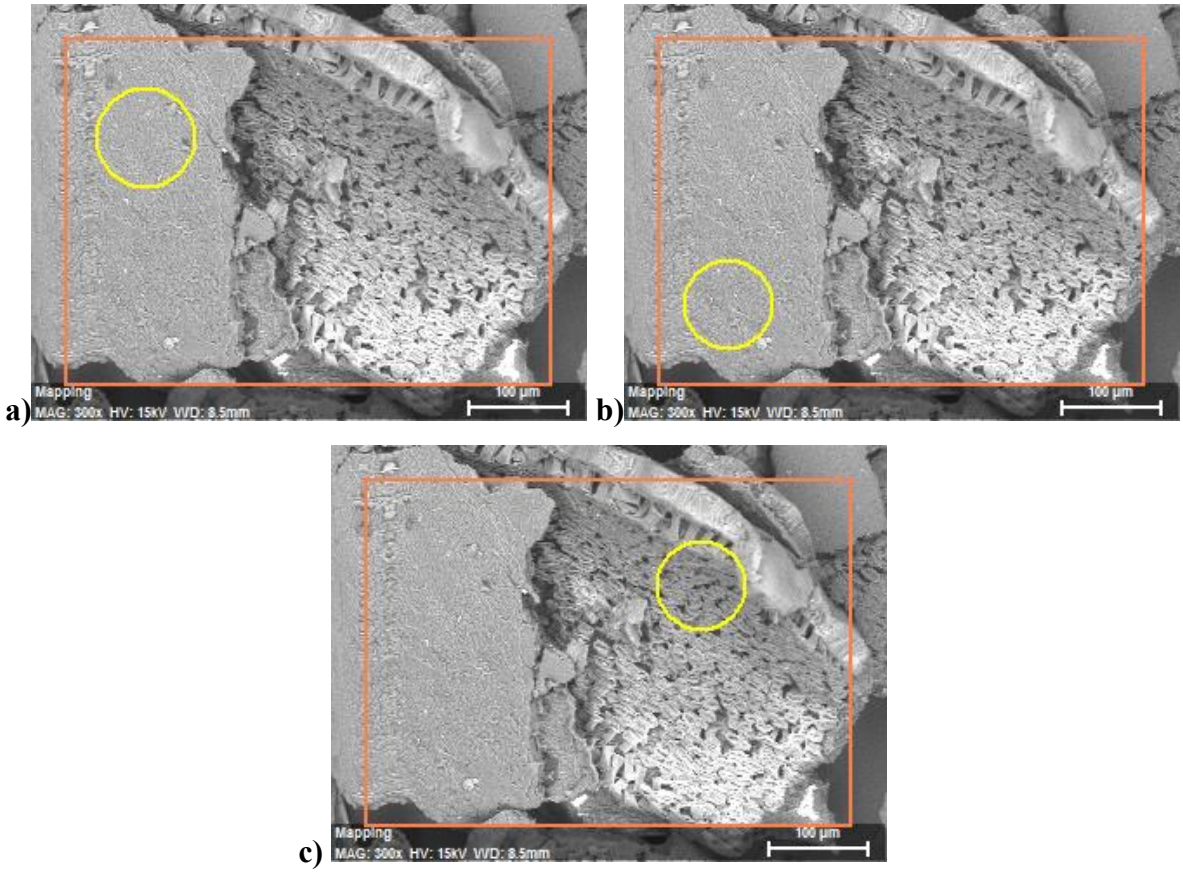
Conforme apresentado na Figura 11, a CSM manteve uma morfologia heterogênea, com partículas de tamanhos variados, formatos irregulares e superfícies fraturadas. Na ampliação de 120x (Figura 11a), observa-se a presença de fragmentos com estrutura mais aberta e regiões altamente rugosas, além de cavidades distribuídas ao longo das partículas.

Nas ampliações de 400x e 500x (Figuras 11b e 11c), é possível observar com maior detalhe a presença de uma estrutura porosa e fibrilar, com cavidades interconectadas e superfícies bastante irregulares. Essas características indicam que a modificação da casca de soja pode ter contribuído para uma maior exposição das estruturas internas do material, favorecendo a formação de regiões com maior rugosidade e disponibilidade de sítios superficiais.

Embora a CSM apresente uma superfície aparentemente mais rugosa e com maior exposição de estruturas internas quando comparada à CSP, os resultados dos ensaios de adsorção indicaram desempenho inferior na remoção do azul de metileno. Esse comportamento sugere que as alterações morfológicas promovidas pela modificação química não foram suficientes para aumentar a capacidade adsortiva do material nas condições avaliadas. Dessa forma, além das características físicas observadas por MEV, fatores relacionados à composição química superficial e à disponibilidade efetiva dos sítios ativos também podem ter influenciado o processo de adsorção.

Para complementar a caracterização morfológica da CSM, realizou-se a análise de EDX com o objetivo de identificar a composição elementar superficial do material após o processo de modificação. Os espectros obtidos em três pontos distintos da amostra são apresentados na Figura 12, enquanto os valores quantitativos correspondentes são apresentados na Tabela 12.

Figura 12. Espectros de EDX da casca de soja modificada obtidos em diferentes pontos de análise: (a) ponto 1, (b) ponto 2 e (c) ponto 3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 12. Composição elementar da casca de soja modificada obtida por EDX.

Ponto Analisado	Carbono (% massa)	Oxigênio (% massa)	Enxofre (% massa)	Carbono (% atômica)	Oxigênio (% atômica)	Enxofre (% atômica)
Ponto 1	50,16	48,61	1,23	57,58	41,89	0,53
Ponto 2	49,07	49,77	1,15	56,49	43,01	0,50
Ponto 3	45,56	54,35	0,09	52,73	47,23	0,04
Média	48,26	50,91	0,82	55,60	44,04	0,36

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os espectros de EDX da CSM evidenciaram a predominância de carbono e oxigênio, além da presença de enxofre em baixa proporção. Conforme apresentado na Tabela 12, os teores médios de carbono e oxigênio foram de 48,26% e 50,91% em massa, respectivamente, enquanto o enxofre apresentou média de 0,82% em massa.

A presença majoritária de carbono e oxigênio está relacionada à natureza lignocelulósica da casca de soja, composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. Entretanto, diferentemente da CSP, na qual foram identificados apenas carbono e oxigênio, a CSM apresentou enxofre em sua composição superficial. Esse resultado indica que o processo de modificação promoveu alteração química na superfície do material, possivelmente associada à incorporação de grupos contendo enxofre.

Observa-se ainda que os teores de enxofre variaram entre os pontos analisados, sendo identificados valores de 1,23%, 1,15% e 0,09% em massa. Essa variação sugere que o enxofre não se encontra distribuído de maneira totalmente homogênea na superfície da CSM, podendo estar mais concentrado em regiões específicas do material.

A presença de oxigênio e enxofre na superfície da CSM pode contribuir para o processo de adsorção do azul de metileno, uma vez que grupos funcionais contendo esses elementos podem atuar como sítios ativos de interação com as moléculas do corante. Dessa forma, os resultados de EDX complementam as observações obtidas por MEV, indicando que a modificação da casca de soja alterou não apenas sua morfologia, mas também sua composição química superficial.

A comparação entre CSP e CSM demonstra que o processo de modificação química promoveu alterações tanto morfológicas quanto químicas na superfície da biomassa. As análises de MEV evidenciaram maior rugosidade e exposição de estruturas internas na CSM, enquanto a análise de EDX confirmou a incorporação de enxofre decorrente do tratamento com ácido sulfúrico. Entretanto, apesar dessas modificações, os ensaios de adsorção indicaram melhor desempenho da CSP na remoção do azul de metileno. Esse resultado sugere que as alterações promovidas pelo tratamento químico não resultaram em aumento da eficiência adsortivo, evidenciando que a simples modificação estrutural do material não garante necessariamente maior capacidade de adsorção.

As alterações morfológicas observadas nas micrografias são semelhantes às reportadas por Gupta e Suhas (2009), que verificaram aumento da rugosidade superficial e da quantidade de cavidades em biomateriais submetidos a tratamentos químicos. Segundo os autores, essas modificações contribuem para o aumento da área superficial disponível e podem favorecer a adsorção de contaminantes.

Resultados semelhantes também foram observados por Nascimento et al. (2014), que relacionaram a presença de poros, fissuras e irregularidades superficiais ao aumento da disponibilidade de sítios ativos para adsorção. Dessa forma, as características morfológicas

observadas neste estudo podem estar associadas ao desempenho adsortivo apresentado pelas amostras avaliadas.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o potencial da casca de soja pura (CSP) e da casca de soja modificada com ácido sulfúrico (CSM) como adsorventes para a remoção do corante azul de metileno em solução aquosa, buscando verificar a influência da modificação química nas propriedades do material e em seu desempenho adsortivo.

Os resultados da caracterização físico-química evidenciaram que o tratamento com ácido sulfúrico promoveu alterações na biomassa, refletidas principalmente no aumento do teor de umidade e na redução do teor de cinzas da CSM. Além disso, o processo de lavagem mostrou-se eficiente na neutralização do material após a ativação química, resultando em valores de pH próximos à neutralidade.

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) demonstraram diferenças morfológicas entre os materiais avaliados. A CSP apresentou superfície heterogênea, com estruturas fibrosas, rugosidades e cavidades superficiais características de materiais lignocelulósicos. Já a CSM apresentou maior rugosidade superficial e evidências de alterações estruturais decorrentes do tratamento químico. Complementarmente, a análise por espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDX) indicou predominância de carbono e oxigênio em ambas as amostras, além da presença de enxofre exclusivamente na CSM, confirmando a efetividade da modificação química promovida pelo ácido sulfúrico.

Nos ensaios de adsorção, ambas as amostras foram capazes de remover o azul de metileno da solução, apresentando redução da concentração do corante ao longo do tempo de contato. Entretanto, a CSP apresentou desempenho superior ao da CSM, alcançando menores concentrações residuais do corante e maior eficiência de remoção nas condições experimentais avaliadas. Esses resultados indicam que a modificação química com ácido sulfúrico não favoreceu o processo de adsorção do azul de metileno, sugerindo que as alterações estruturais e químicas promovidas pelo tratamento não resultaram em aumento da disponibilidade efetiva dos sítios ativos responsáveis pela adsorção.

A análise dos modelos de adsorção demonstrou que os dados obtidos para a CSP apresentaram melhor ajuste aos modelos de Langmuir e Freundlich, sugerindo elevada afinidade entre o adsorvente e o adsorvato e evidenciando características associadas tanto à heterogeneidade superficial quanto à formação predominante de monocamada. Para a CSM, os ajustes foram pouco representativos, corroborando o menor desempenho adsortivo observado experimentalmente.

Dessa forma, os resultados obtidos permitem concluir que a CSP apresenta potencial para utilização como adsorvente alternativo, de baixo custo, abundante e oriundo de

fonte renovável, contribuindo para o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais e para o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao tratamento de efluentes contendo corantes. Além disso, o estudo demonstrou que a modificação química de biomateriais deve ser cuidadosamente avaliada, uma vez que alterações morfológicas e químicas nem sempre resultam em melhorias na capacidade adsortiva do material.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos complementares envolvendo diferentes condições de ativação química, avaliação de outros agentes modificadores, determinação da área superficial específica e da distribuição de poros, bem como a investigação da adsorção de diferentes classes de contaminantes. Tais estudos poderão contribuir para a otimização do uso da casca de soja como material adsorvente e ampliar sua aplicação em processos de tratamento de águas residuárias.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. A. A. et al. *Sorghum straw: pulping and bleaching process optimization and synthesis of cellulose acetate*. International Journal of Biological Macromolecules, [s.l.], v. 135, p. 877-886, 2019.

AOAC INTERNATIONAL. *Official methods of analysis of AOAC International*. 17. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2000.

BRANDÃO, T. C. A.; RAMON, Q. V.; SILVA, C. G. *Síntese e caracterização de carvão ativado quimicamente com H3PO4 e NaOH a partir da casca de pequi (Caryocar brasiliense)*. Revista Brasileira de Desenvolvimento Braz. Curitiba, v. 6, n. 8, 2020.

CARDOSO, N. F. *Adsorção de corantes têxteis utilizando biossorventes alternativos*. 2012. 120 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

COLOMBO, A. *Biossorção do íon cádmio e chumbo pela casca de soja*. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2013.

CRINI, G. *Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review*. Bioresource Technology, v. 97, n. 9, p. 1061-1085, 2006.

CUSIOLI, L. F.; QUESADA, H. B.; BAPTISTA, A. T. A.; GOMES, R. G.; BERGAMASCO, R. *Soybean hulls as a low-cost biosorbent for removal of methylene blue contaminant*. Environmental Progress & Sustainable Energy, p. 1-10, 2019.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. *Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DEMIRBAS, A. *Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections*. Energy Conversion and Management, Oxford, v. 49, n. 8, p. 2106-2116, 2008.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. *Insights into the modeling of adsorption isotherm systems*. Chemical Engineering Journal, Amsterdam, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

FRANÇA, R. S. S. S. R. de. *Obtenção de carvão a partir de casca de soja e aplicação na adsorção de herbicidas*. 2019. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

FREUNDLICH, H. M. F. *Über die Adsorption in Lösungen*. Zeitschrift für Physikalische Chemie, v. 57, p. 385-470, 1906.

GOLDSTEIN, J. I. et al. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. 4. ed. New York: Springer, 2018.

GONG, R. et al. *Kinetics and thermodynamics of basic dye sorption on phosphoric acid esterifying soybean hull with solid phase preparation technique*. Bioresource Technology, [s.l.], v. 99, p. 4510-4514, 2008.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. *Corantes têxteis*. Química Nova, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 71-78, 2000.

GUPTA, N.; KUSHWAHA, A. K.; CHATTOPADHYAYA, M. C. *Application of potato (Solanum tuberosum) plant wastes for the removal of methylene blue and malachite green dye from aqueous solution*. Arabian Journal of Chemistry, v. 9, p. S707-S716, 2016.

GUPTA, V. K.; SUHAS. *Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review*. Journal of Environmental Management, v. 90, n. 8, p. 2313-2342, 2009.

HARAZONO, K.; NAKAMURA, K. *Decolorization of mixtures of different reactive textile dyes by the white-rot basidiomycete Phanerochaete sordida and inhibitory effect of polyvinyl alcohol*. Chemosphere, v. 59, n. 1, p. 63-68, 2005.

JORGE, I. R.; TAVARES, F. P.; SANTOS, K. G. *Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em bagaço de cana de açúcar*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E POLÍMEROS, 37., 2015, São Carlos. Anais... São Carlos: [s.n.], 2015.

KHELIFI, E. et al. *Effect of nitrogen and carbon sources on indigo and Congo red decolourization by Aspergillus alliaceus strain 121C*. Journal of Hazardous Materials, [s.l.], v. 163, n. 2-3, p. 1056-1062, 2009.

KRISHNANI, K. K. et al. *Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk*. Journal of Hazardous Materials, [s.l.], v. 153, n. 3, p. 1222-1234, 2008.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G. de; DURÁN, N. *Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis*. Química Nova, [s.l.], v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

LANGMUIR, I. *The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum*. Journal of the American Chemical Society, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

LI, J. et al. *Biosorption of Pb^{2+} with modified soybean hulls as absorbent*. Chinese Journal of Chemical Engineering, [s.l.], v. 19, n. 2, p. 334-339, 2011.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. *Unit operations of chemical engineering*. 6. ed. New York: McGraw Hill International, 2001.

MIELENZ, J. R.; BARDSLEY, J. S.; WYMAN, C. E. *Fermentation of soybean hulls to ethanol while preserving protein value*. Bioresource Technology, [s.l.], v. 100, n. 14, p. 3532-3539, 2009.

MÓDENES, A. N. et al. *Inhibitory effect on the uptake and diffusion of Cd^{2+} onto soybean hull sorbent in Cd-Pb binary sorption systems*. Journal of Environmental Management, [s.l.], v. 154, p. 22-32, 2015.

MÜLLER, L. C.; ALVES, A. A. de A.; MONDARDO, R. I.; SENS, M. L. *Adsorção do azul de metileno em serragem de Pinus elliottii (pinus) e Drepanostachyum falcatum (bambu)*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 4, p. 687-695, 2019.

NASCIMENTO, F. R.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, B. C.; MELO, Q. D.; RAULINO, C. S. G. *Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais*. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p.

NASCIMENTO, R. F. et al. *Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais*. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

OLADIPO, A. A.; GAZI, M. *Enhanced removal of Crystal violet by low cost alginate/acid activated bentonite composite beads: optimization and modelling using nonlinear regression technique*. Journal of Water Process Engineering, v. 2, p. 43-52, 2014.

OLIVEIRA, F. M. de; COELHO, L. M.; MELO, E. I. de. *Avaliação de processo adsortivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante azul de metileno*. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 4, p. e-12223, 2018.

OLIVEIRA, F. M.; COELHO, L. M.; MELO, E. I. *Impactos ambientais do corante azul de metileno em ecossistemas aquáticos*. Matéria, v. 23, n. 4, 2018.

PAZ, J. E. M.; GARNICA, A. I. C.; CURBELO, F. D. S. *Estudo da adsorção de chumbo utilizando como adsorvente bagaço de cana-de-açúcar ativado*. HOLOS, Natal, v. 8, p. 1-15, 2018.

QUEIROZ, M. T. A. et al. *Reestruturação na forma do tratamento de efluentes têxteis: uma proposta embasada em fundamentos teóricos*. Gestão & Produção, v. 26, n. 1, e1149, 2019.

RIGUETO, C. V. T. et al. *Adsorption study with NaOH chemically treated soybean hull for textile dye removal*. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, [s.l.], v. 10, n. 5, p. 161-168, 2019.

SANTOS, G. M. *Adsorção do corante azul de metileno em carvão ativado da casca de pequi pura e modificada como alternativa para tratamento de efluentes*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Anápolis, Anápolis, 2025.

SILVA, F. A.; CANTANHEDE, L. B.; MARQUES, I. S.; FIGUEREDO, G. P. de. *Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado preparado a partir da casca do tamboril (Enterolobium contortisiliquum)*. Química Nova, v. 47, n. 3, p. e20230106, 2024.

SILVA, J. E. et al. *Produção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais: casca de soja*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, [s.l.], v. 22, n. 5, p. 356-361, 2018.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. *Princípios de Análise Instrumental*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2018.

URBANO, K. B.; LEITE, A. G.; JUSTO, B. G. *Estudo das propriedades e características de diferentes tipos de adsorventes de detergentes para residências ecológicas*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Técnico em Química. Escola Técnica Trajano Camargo. Limeira.

YAGUB, M. T. et al. *Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review*. Advances in Colloid and Interface Science, [s.l.], v. 209, p. 172-184, 2014.

YOUSSEF, A. M.; EL-NABARAWY, T.; SAMRA, S. E. *Sorption properties of chemically-activated carbons: sorption of cadmium(II) ions*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, v. 235, p. 153, 2004.