



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

IVAN VICTOR CABRAL DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO USO DA BORRA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE PARA A
REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO PRESENTE EM ÁGUAS
RESIDUÁRIAS**

**CAMPINA GRANDE
2024**

IVAN VICTOR CABRAL DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO USO DA BORRA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE PARA A
REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO PRESENTE EM ÁGUAS
RESIDUÁRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Dr. Fernando Fernandes Vieira

Coorientadora: Dra. Ysa Helena Diniz Moraes de Luna

CAMPINA GRANDE - PB

2024

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48a Oliveira, Ivan Victor Cabral de.

Avaliação do uso da borra de café, como adsorvente para a remoção do corante azul de metileno, presente em águas residuárias [manuscrito] / Ivan Victor Cabral de Oliveira. - 2024.
22 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação : Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT".

"Coorientação: Prof. Dra. Ysa Helena Diniz Moraes de Luna, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT".

1. Indústria têxtil. 2. Adsorção - borra de café. 3. Azul de metileno. 4. Tratamento de águas residuais. I. Título

21. ed. CDD 628

IVAN VICTOR CABRAL DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO USO DA BORRA DE CAFÉ, COMO ADSORVENTE PARA A
REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO, PRESENTE EM ÁGUAS
RESIDUÁRIAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Engenharia Sanitária e Ambiental da
Universidade Estadual da Paraíba,
como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Sanitária e Ambiental

Aprovada em: 21/11/2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria José de Sousa Cordão** (***.952.424-**), em **25/11/2024 11:37:03** com chave **bc869a14ab3a11ef99571a7cc27eb1f9**.
- **Fernando Fernandes Vieira** (***.840.164-**), em **25/11/2024 07:55:50** com chave **d558633eab1b11efa4e906adb0a3afce**.
- **Carlos Antonio Pereira de Lima** (***.847.524-**), em **27/11/2024 10:23:15** com chave **c202a882acc211efaa2206adb0a3afce**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 27/01/2025

Código de Autenticação: e9abc1



AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período em que me dediquei a este trabalho.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas de cinética de secagem da borra de café em estufa de recirculação de ar.....	11
Figura 2 - Modelos de Page, Logarítmico e Henderson e Panbis ajustado aos dados de secagem da borra do café na temperatura de 70°C.....	12
Figura 3 - Modelos de Page, Logarítmico e Henderson e Panbis ajustado aos dados de secagem da borra do café na temperatura de 80°C.....	13
Figura 4 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para %RED com $\alpha = 0,05$	15
Figura 5 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para QT com $\alpha = 0,05$	16
Figura 6 – Gráfico de contorno para variável dependente QT analisando as interações entre Massa e Concentração.....	17
Figura 7 – Gráfico de contorno para variável dependente QT analisando as interações entre Tempo e Concentração.....	18
Figura 8 – Gráfico de contorno para variável dependente %RED analisando as interações entre Massa e Concentração.....	18
Figura 9 – Gráfico de contorno para variável dependente %RED analisando as interações entre Tempo e Concentração.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalo de tempo utilizado para pesagem durante a secagem.....	9
Tabela 2 - Valores codificados e reais das variáveis operacionais dos experimentos de adsorção.....	10
Tabela 3 – Comparação dos parâmetros dos modelos de secagem da borra de café com os dados obtidos nos experimentos realizados a 70 e 80°C.....	13
Tabela 4 – Coeficiente de determinação dos modelos de Page, Logarítmico e Henderson e Pabis para a secagem da borra de café a 70 e 80°C.....	14
Tabela 5 - Planejamento experimental para as respostas QT e %RED.....	14
Tabela 6 – Efeitos estimados e coeficientes de %RED.....	16
Tabela 7 – Efeitos estimados e coeficientes de QT.....	17

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. METODOLOGIA	9
2.1 Preparo do material adsorvente	9
2.2 Preparação do adsorvato	10
2.3 Ensaios de adsorção	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
3.1 Cinética de secagem da borra do café.....	11
3.2 Avaliação dos modelos de secagem.....	12
3.3 Matriz do planejamento experimental	14
3.4 Estudo estatístico da adsorção	15
4. CONCLUSÃO	20
REFERÊNCIAS.....	21

AVALIAÇÃO DO USO DA BORRA DE CAFÉ, COMO ADSORVENTE PARA A REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO, PRESENTE EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

EVALUATION OF THE USE OF COFFEE GROUNDS AS AN ADSORBENT FOR THE REMOVAL OF METYLENE BLUE DYE, PRESENT IN WASTEWATER

Ivan Victor Cabral de Oliveira¹

Fernando Fernandes Vieira²

Ysa Helena Diniz Moraes de Luna³

RESUMO

A indústria da moda é a segunda maior poluidora do mundo, atrás apenas da indústria petrolífera. Levantamentos apontam que mais de 92 milhões de toneladas de resíduos têxteis foram descartados em anos recentes. A busca por métodos para remoção desses poluentes, como corantes e metais pesados, tem sido tendência entre entidades de pesquisa. A adsorção é uma prática utilizada para tratamento desses resíduos têxteis, especialmente remoção de corantes. Neste trabalho, avaliou-se a secagem da borra de café nas temperaturas de 70°C e 80°C, analisando seu potencial como bioadsorvente de corante têxtil sintético. Para descrever a cinética de secagem do material, foram utilizados os modelos de Page, Logarítmico e Henderson e Pabis. O modelo de Page se ajustou melhor aos dados experimentais. Foi preparado um planejamento fatorial para analisar a influência das variáveis independentes na quantidade de corante adsorvida (QT) e na porcentagem de redução da concentração de corante (RED%). Os resultados obtidos evidenciam que, os números foram satisfatórios, possuindo a adsorção mais eficiente no experimento com alta concentração de corante e maior tempo de contato e menores valores de massa do adsorvente.

Palavras-Chave: indústria têxtil, adsorção, borra de café, azul de metileno.

ABSTRACT

The fashion industry is the second largest polluter in the world, behind only the oil industry. Surveys indicate that more than 92 million tons of textile waste have been discarded in recent years. The search for methods to remove these pollutants, such as dyes and heavy metals, has been a trend among research entities. Adsorption is a practice used to treat these textile wastes, especially dye removal. In this study, the drying of coffee grounds at temperatures of 70°C and 80°C was evaluated, analyzing their potential as a bioadsorbent for synthetic textile dye.

¹ Estudante de Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Estadual da Paraíba; Campina Grande, PB; ivcvcabral@gmail.com;

² Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Estadual da Paraíba; Campina Grande, PB; Fernando.desa@servidor.uepb.edu.br;

³ Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba; Campina Grande, PB; ysaluna@servidor.uepb.edu.br;

The Page, Logarithmic, and Henderson and Pabis models were used to describe the drying kinetics of the material. The Page model best adjusted the experimental data. A factorial design was prepared to analyze the influence of the independent variables on the amount of dye adsorbed (QT) and the percentage of reduction in dye concentration (RED%). The results obtained show that the numbers were satisfactory, with the most efficient adsorption in the experiment with high dye concentration and longer contact time and lower adsorbent mass values.

Keywords: textile industry, adsorption, coffee grounds, methylene blue.

1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil possui uma importância significativa nos setores econômicos brasileiro e mundial. A cadeia têxtil e de confecção apresentou um faturamento de R\$193,2 bilhões em 2022 (Abit, 2024). As atividades têxteis possuem etapas como tingimento e acabamento que demandam elevado consumo de água como recurso fundamental para finalização desses processos (Xavier et al., 2019).

A Equipe TOTVS (2023), uma das maiores empresas de tecnologia da América Latina e desenvolve sistemas de gestão empresarial (ERP), relata que

o impacto da indústria têxtil no Brasil é gigantesco, principalmente na economia, com a movimentação de renda para diversos negócios e, ainda, a geração de empregos. Estamos falando de um país que representa, segundo a Abit (Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção), a 5ª maior indústria têxtil e o 4º no segmento de vestuário no mundo.

A poluição por corantes têxteis pode desencadear um problema ambiental significativo associado a essa indústria. Corantes são substâncias químicas usadas para conferir cor aos tecidos e outros materiais têxteis durante o processo de tingimento. Alguns desse impactos são o descarte do efluente nos ecossistemas aquáticos e no consumo humano pela rede de abastecimento.

A busca por formas de mitigar prejuízos ao meio ambiente, se tornou tendência e necessidade entre as entidades científicas. Dessa forma, o desenvolvimento de técnicas e aperfeiçoamento de algumas já existentes, vem fazendo com que esses impactos negativos sejam amenizados.

Uma dessas formas é a adsorção, que segundo Ruthven (1984), é uma operação de transferência de massa, a qual estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos. Uma vez que os componentes adsorvidos, concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, tanto mais favorável será a adsorção. Por isso, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas.

O café é mais que um simples produto, ele faz parte da vida cotidiana de muitas pessoas. Por consequência, a borra de café produzida se enquadra nos critérios para produção de adsorventes de baixo custo, uma vez que ela é rica em carbono além de estar prontamente disponível (Soares et al., 2011)

O desenvolvimento de técnicas sustentáveis vem crescendo e compondo um futuro mais equitativo para as atuais e futuras gerações. Dessa forma, a busca por bioprodutos que seriam descartados é uma oportunidade para o desenvolvimento de propriedades que podem apoiar processos de adsorção, para a manutenção do meio ambiente.

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou avaliar o potencial da borra de café a partir da secagem sob as temperaturas de 70°C e 80°C como adsorvente para a remoção de corante têxteis presente em águas residuárias industriais, verificando os seguintes fatores: quantidade de corante adsorvido (QT) e a porcentagem de redução da concentração de corante (RED%).

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), em Campina Grande-PB.

2. METODOLOGIA

2.1 Preparo do material adsorvente

Para a produção da matéria prima adsorvente, foi realizada através de coleta de material em uma residência, que era feito o café comum em chaleira, e a borra do café ficava retida no coador. Procedeu-se a lavagem da borra de café em água corrente proveniente da rede de abastecimento, operada pela CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba), seguida da lavagem com água destilada, com a finalidade de retirar outras substâncias adicionadas ao café durante o seu processamento.

A determinação da umidade inicial da borra de café foi feita com um medidor de umidade por infravermelho. O processo de secagem foi realizado com amostras de 100g em triplicata, em uma estufa com recirculação de ar nas temperaturas de 70°C e 80°C, até que o material apresentasse massa constante. O produto foi armazenado em sacos plásticos a vácuo, para melhor conservação de suas propriedades.

Durante o processo de secagem, o material foi retirado da estufa e pesado, em determinados intervalos de tempo, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Intervalo de tempo utilizado para pesagem durante a secagem

Tempo	Pesagem
1° hora	5 em 5 minutos
2° hora	10 em 10 minutos
3° hora	15 em 15 minutos
A partir da 4° hora	30 em 30 minutos

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos de cinética de secagem de Page, Logarítmico e Henderson e Pabis. Esses modelos matemáticos descrevem o comportamento da transferência de calor e massa entre o produto e o agente de secagem. Com base nesses modelos, é possível estimar o tempo necessário para reduzir o teor de água do produto. A estimativa dos parâmetros dos modelos cinéticos foi obtida por regressão não linear com o auxílio do software

Minitab disponibilizado pelo Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA/UEPB).

2.2 Preparação do adsorvato

O efluente têxtil sintético (ETS) foi preparado com uma dissolução de 500mg do corante azul de metileno em 1 Litro de água destilada. Esta solução base foi utilizada para o preparo das amostras dos ensaios através de diluição em água destilada.

Para caracterização do ETS, foi realizada a varredura no espectrofotômetro numa faixa de 500nm a 700nm, e determinado o comprimento de onda de máxima absorção, sendo este 660nm. Posteriormente, foi construída uma curva de calibração, utilizando soluções nas concentrações de 5, 10, 20, 30, 40 e 50mg.L⁻¹.

2.3 Ensaios de adsorção

Os ensaios foram elaborados para um planejamento fatorial tipo 2³, com 3 repetições no ponto central, totalizando 11 experimentos, para avaliar a influência das variáveis experimentais do material sobre duas respostas, a quantidade de azul de metileno adsorvido por unidade de massa do adsorvente (QT) e a porcentagem da redução da concentração da solução de corante têxtil (RED%), a fim de determinar as melhores condições de trabalho.

As variáveis utilizadas no processo foram:

- massa do adsorvente,
- concentração do corante e
- tempo de contato

Após o processo de secagem, o material obtido foi testado sob as condições operacionais definidas no planejamento experimental. O experimento foi realizado utilizando o material adsorvente resultante da secagem a 70°C. A tabela 2 abaixo mostra os valores codificados e reais das variáveis operacionais do experimento de adsorção.

Tabela 2 - Valores codificados e reais das variáveis operacionais dos experimentos de adsorção

Pontos	-1	0	+1
Massa do adsorvente (g)	10	20	30
Concentração do corante (mg.L ⁻¹)	40	60	80
Tempo (min)	30	45	60

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os experimentos de adsorção foram realizados sobre uma mesa agitadora orbital, utilizando-se frascos Erlenmeyer de 125mL contendo 25mL da solução de corante produzida. As condições de cada Erlenmeyer foram definidas a partir da matriz do planejamento experimental.

Após o tempo de contato estabelecido no planejamento, todas as amostras foram filtradas e levadas para centrifugação por um período de 30 minutos em rotação de 2500rpm. A porcentagem de redução do corante (RED%) e a quantidade de

corante adsorvida por unidade de massa do adsorvente (QT) foram calculadas pelas equações 1 e 2, respectivamente:

$$\%RED = \frac{C_0 - C_t}{C_t} \times 100\% \quad (1)$$

$$QT = \frac{V (C_0 - C_t)}{m} \quad (2)$$

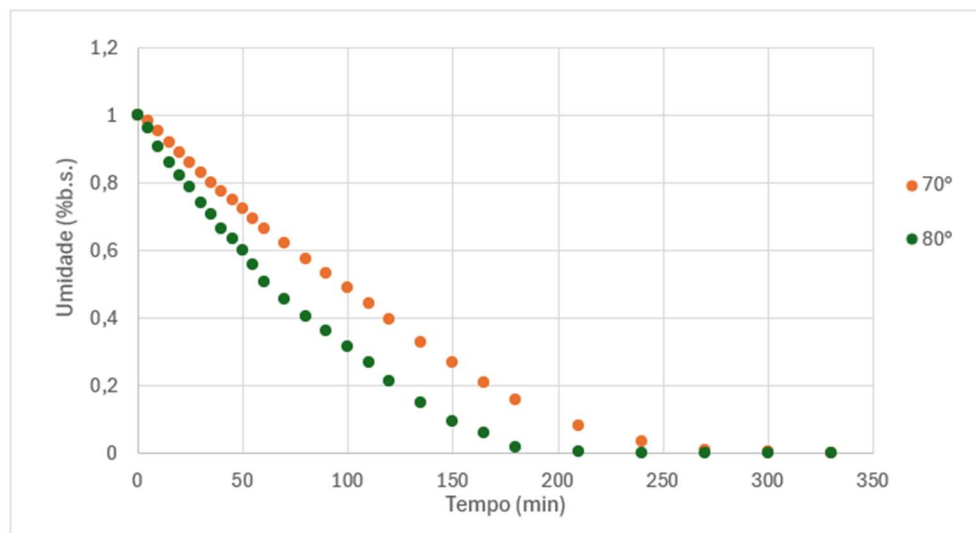
Onde: **%RED** é a porcentagem de redução da concentração do corante (%), **QT** é a quantidade de corante adsorvido pela borra do café (mg. g⁻¹), **C₀** é a concentração inicial do corante (mg. L⁻¹), **C_t** é a concentração do corante em um instante de tempo t (mg. L⁻¹), **m** é a massa do adsorvente em base seca (g), e **V** o volume da solução do corante (L).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cinética de secagem da borra do café

A Figura 1 aborda a variação da umidade ao longo do tempo durante os experimentos de secagem da borra do café em uma estufa com recirculação de ar, realizados a temperaturas de 70°C e 80°C.

Figura 1 – Curvas de cinética de secagem da borra de café em estufa de recirculação de ar



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A umidade inicial da borra do café após a lavagem foi de 19,80% de sua massa total.

A velocidade do processo é influenciada pelo aumento da temperatura durante a secagem da borra de café. Além disso, a temperatura influencia na umidade de

equilíbrio, resultando em valores mais baixos em temperaturas mais elevadas, chegando ao equilíbrio de forma mais rápida.

3.2 Avaliação dos modelos de secagem

Os modelos matemáticos de cinética de secagem de Page, Logarítmico e Henderson e Pabis, são amplamente utilizados para descrever o comportamento da remoção de umidade em materiais sob diferentes condições. Esses modelos pertencem à classe dos modelos empíricos e semiempíricos, baseados em ajustes de equações a dados experimentais de secagem. O modelo de Page, uma extensão do modelo exponencial clássico, introduz um fator adicional que melhora a flexibilidade para representar diferentes materiais e condições de secagem. O modelo Logarítmico destaca-se por sua capacidade de capturar o comportamento em estágios iniciais e finais da secagem. Já o modelo de Henderson e Pabis, um dos mais tradicionais, utiliza uma abordagem exponencial simples para representar a taxa de redução de umidade.

As equações dos modelos matemáticos de Page(1), Logarítmico(2) e Henderson e Pabis(3) que foram utilizadas estão descritas abaixo:

$$RU = \exp(-k \cdot t^n) \quad (1)$$

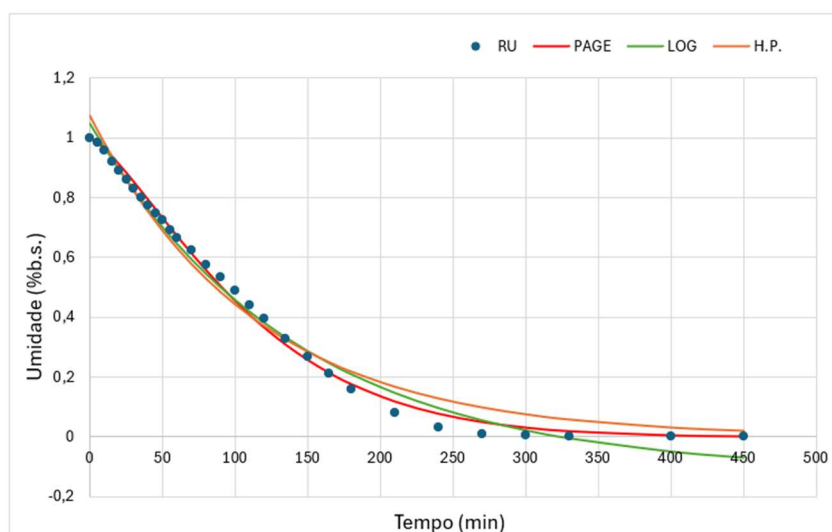
$$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c \quad (2)$$

$$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (3)$$

Onde RU significa razão de umidade.

Na Figura 2 são apresentados os dados experimentais obtidos da cinética da secagem a 70°C que foram ajustados aos modelos empíricos de Page, Logarítmico e Henderson e Pabis.

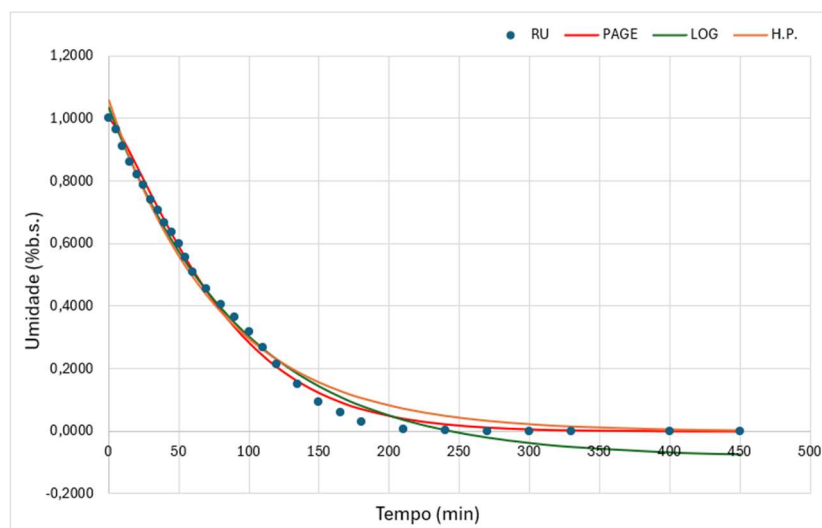
Figura 2 - Modelos de Page, Logarítmico e Henderson e Panbis ajustado aos dados de secagem da borra do café na temperatura de 70°C.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 3 são apresentados os dados experimentais obtidos da cinética da secagem a 80°C que foram ajustados aos modelos empíricos de Page, Logarítmico e Henderson e Pabis.

Figura 3 - Modelos de Page, Logarítmico e Henderson e Panbis ajustado aos dados de secagem da borra do café na temperatura de 80°C.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 3 apresenta o parâmetro encontrado a partir dos resultados experimentais ajustados para cada um dos modelos aplicados.

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros dos modelos de secagem da borra de café com os dados obtidos nos experimentos realizados a 70 e 80°C

Temperatura	Modelo	a (adm)	k (min-1)	n (adm)	c (min-1)
70°C	Page	-	0,00163	1,34215	-
	Logarítmico	1,16929	0,00705	-	-0,1201
	Henderson e Pabis	1,07321	0,00886	-	-
80°C	Page	-	0,0039	1,25506	-
	Logarítmico	1,12217	0,01064	-	-0,08579
	Henderson e Pabis	1,05839	0,01275	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Tabela 4 mostra a análise de variância dos modelos a partir do ajuste das equações matemáticas por regressão não linear dos dados de cinética de secagem da borra de café.

Tabela 4 – Coeficiente de determinação dos modelos de Page, Logarítmico e Henderson e Pabis para a secagem da borra de café a 70 e 80°C

Temperatura	Modelo	SQE final	GLE	MSE
70°C	Page	0,015	27	0,0006
	Logarítmico	0,0319	27	0,0012
	Henderson e Pabis	0,0635	28	0,0023
80°C	Page	0,0133	25	0,0005
	Logarítmico	0,0206	25	0,0008
	Henderson e Pabis	0,0414	26	0,0016

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Todos os modelos investigados exibiram uma concordância satisfatória com os dados experimentais. Contudo, o modelo proposto por Page e o destacou-se com resultados superiores, conforme evidenciado pelos critérios estatísticos do erro médio quadrático (MSE) nas temperaturas empregadas. Vale evidenciar que, dado o caráter não linear desses modelos, a utilização exclusiva do MSE como critério de análise pode ser insuficiente.

3.3 Matriz do planejamento experimental

A tabela 5 mostra a matriz do planejamento experimental, que aborda as variáveis utilizadas: massa do adsorvente, concentração do corante e tempo de mistura, junto com os valores da quantidade de corante por unidade de massa do adsorvente (QT) e a porcentagem da redução da concentração de solução do corante (%RED).

Tabela 5 - Planejamento experimental para as respostas QT e %RED

Experimento	Massa (g)	Concentração da solução (mg.L ⁻¹)	Tempo (min)	QT (mg.g ⁻¹)	%RED
1	0,1	40	30	9,5992	95,99
2	0,3	40	30	3,2894	98,68
3	0,1	80	30	19,0559	95,28
4	0,3	80	30	6,5524	98,29
5	0,1	40	60	9,6994	96,99
6	0,3	40	60	3,3017	99,05
7	0,1	80	60	19,6308	98,15
8	0,3	80	60	6,5612	98,42
9	0,2	60	45	7,3259	97,68
10	0,2	60	45	7,3497	98,00
11	0,2	60	45	7,3470	97,96

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A partir dos resultados obtidos, com a finalidade de maior redução do corante têxtil, observa-se que o experimento 6, utilizando 0,3g do bioadsorvente, concentração do corante de 40mg.L⁻¹ e tempo de contato entre o bioadsorvente e adsorvato de 60 minutos, teve uma maior redução da concentração do corante. Com a finalidade para

maiores valores de QT, o experimento 7, utilizando 0,1g do bioadsorvente, concentração do corante 80mg.L⁻¹ e tempo de contato entre o bioadsorvente e adsorvato de 60 minutos, apresentou as melhores condições para redução da concentração do corante têxtil.

3.4 Estudo estatístico da adsorção

Os efeitos estatisticamente significativos, a partir das variáveis independentes (massa, tempo e concentração) e suas interações diante as variáveis resposta (QT e %RED), são observados nas Figuras 4 e 5, através dos gráficos de Pareto. O gráfico de Pareto é uma ferramenta visual amplamente utilizada para identificar e priorizar problemas, causas ou fatores em um processo, baseado no princípio de Pareto. Todos os valores exibidos que estão à direita da linha P de 0,05 são estatisticamente significantes ou de alta significância estatística. Sendo assim, observa-se que para RED% (Figura 5), apenas os fatores A e C, massa e tempo respectivamente, mostram ser estatisticamente significantes com nível de confiança de 95%. Já em QT (Figura 9), os fatores A e B, massa e concentração respectivamente, e a interação de AB (massa-concentração) são estatisticamente significativas com nível de confiança de 95%.

Figura 4 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para %RED com $\alpha = 0,05$

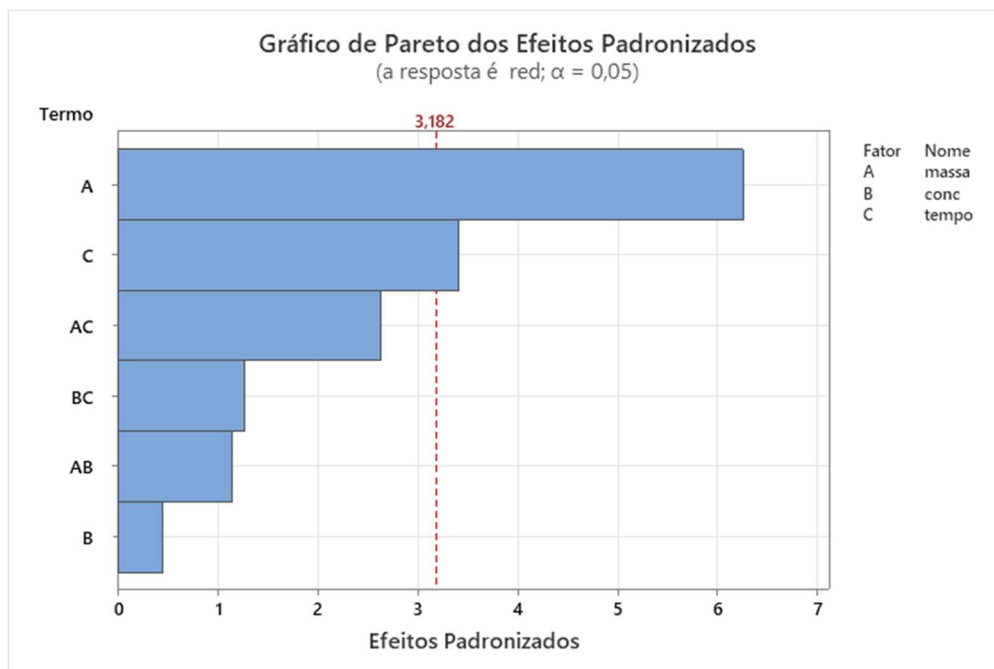
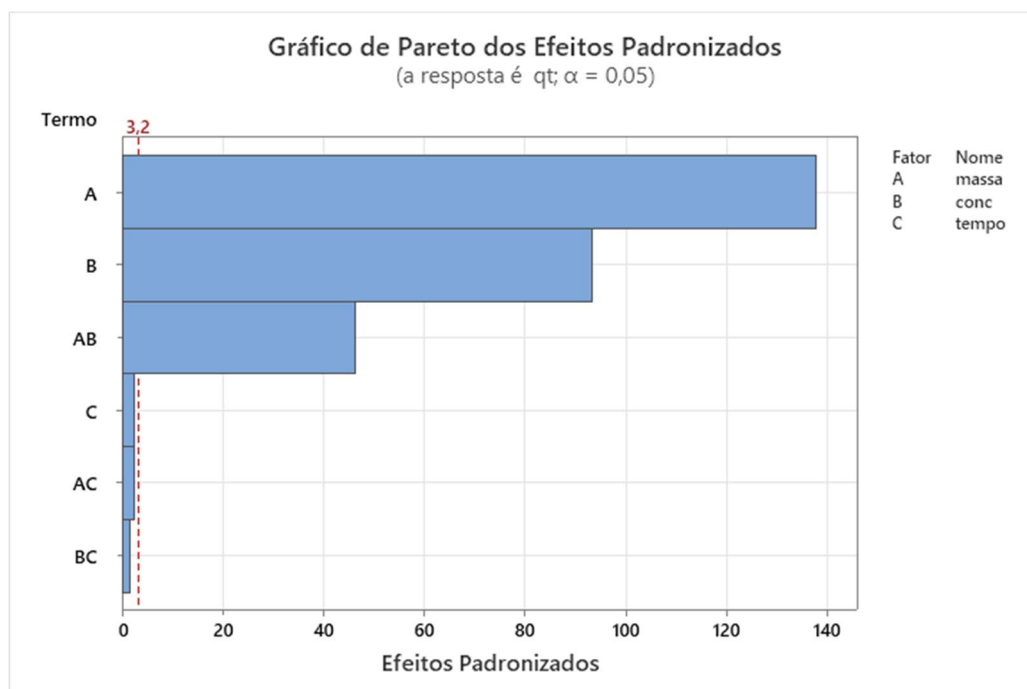


Figura 5 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para QT com $\alpha = 0,05$ 

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As Tabela 6 e 7 trazem os valores estimados dos efeitos principais dos fatores envolvidos em QT e RED% e suas respectivas interações. Quanto maior o valor em um efeito, maior será sua influência no processo a ser analisado. Um efeito quando positivo, mostra que o aumento desta variável causa um aumento na resposta, por outro lado, o efeito negativo indica que com um aumento da variável ocorre uma diminuição na resposta. O valor de P indica qual fator ou efeito é significativo, quando o valor de P for menor do que o nível de significância $\alpha = 0,05$ é possível dizer que o efeito é significativo. Na Tabela 6 pode se observar que, para %RED, as variáveis massa e tempo apresentaram efeito positivo, logo o aumento dessas variáveis será favorável, já a concentração apresentou efeito negativo. Para QT, na Tabela 7, as variáveis concentração e tempo apresentaram, efeito positivo, indicando que o aumento dessa variável é favorável ao processo de redução.

Tabela 6 – Efeitos estimados e coeficientes de %RED

Variáveis	Efeito	Coeficiente	Desvio Coef.	T	P
Constante		97,607	0,160	608,99	0,000
(1) Massa	2,004	1,002	0,160	6,25	0,008
(2) Concentração	-0,145	-0,073	0,160	-0,45	0,682
(3) Tempo	1,094	-0,547	0,160	3,41	0,042
1*2	-0,369	-0,185	0,160	-1,15	0,333
1*3	-0,844	-0,422	0,160	-2,63	0,078
2*3	0,409	0,204	0,160	1,28	0,292

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 7 – Efeitos estimados e coeficientes de QT

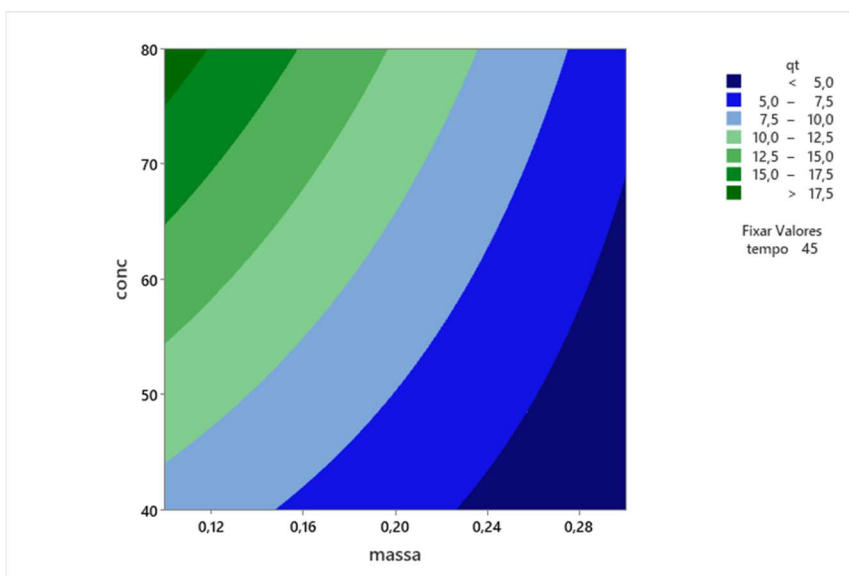
Variáveis	Efeito	Coeficiente	Desvio Coef.	T	P
Constante		9,7112	0,347	279,74	0,000
(1) Massa	-9,5701	-4,7851	0,347	-137,84	0,000
(2) Concentração	6,4777	3,2388	0,347	93,30	0,000
(3) Tempo	0,1741	0,0870	0,347	2,51	0,087
1*2	-3,2164	-1,6082	0,347	-46,33	0,000
1*3	-0,1635	-0,0818	0,347	2,35	0,100
2*3	0,1178	0,0589	0,347	1,70	0,188

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por meio da análise dos gráficos de contorno, as Figuras 6, 7, 8 e 9, observe-se nas áreas indicadas na barra de cores, as melhores condições dos fatores com relação a quantidade de corante adsorvido e redução da concentração do corante na solução.

Na Figura 6 mostra que para atingir uma maior quantidade de corante adsorvido, ou seja, para obter uma maior eficiência na remoção do corante têxtil, são necessários valores baixos de massa do bioadsorvente e valores elevados de concentração do corante.

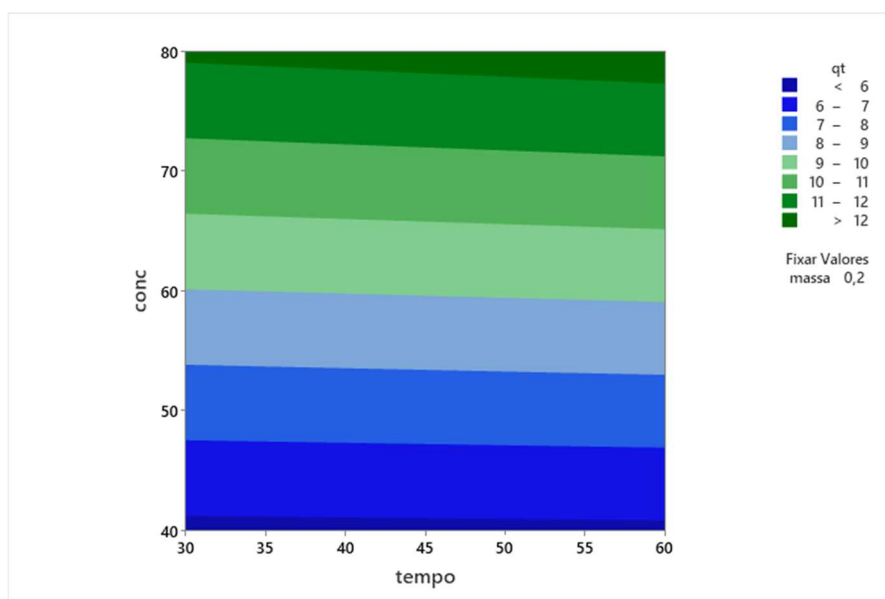
Figura 6 – Gráfico de contorno para variável dependente QT analisando as interações entre massa do adsorvente e concentração do corante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 7, mostra que com o aumento da concentração do corante, ocorre um aumento na quantidade de corante adsorvido por unidade de massa do adsorvente, chegando a melhores resultados. No entanto, o tempo de contato se mostra irrelevante neste caso.

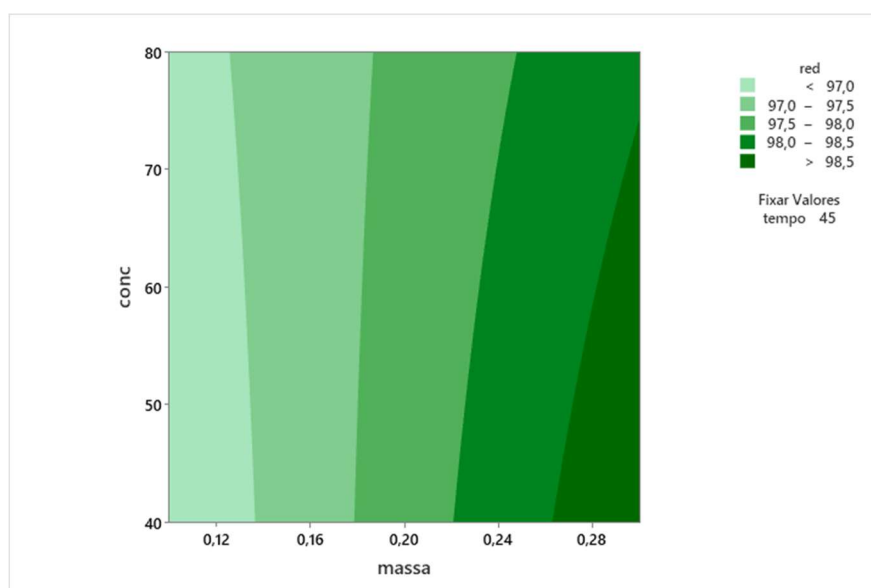
Figura 7 – Gráfico de contorno para variável dependente QT analisando as interações entre tempo de contato e concentração do corante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observa-se na Figura 8 a relação entre massa do adsorvente e concentração do corante em resposta a %RED. Quando ocorre o aumento dos valores de massa do adsorvente utilizado e diminuição da concentração do corante, serão obtidos os maiores valores de redução de concentração do corante.

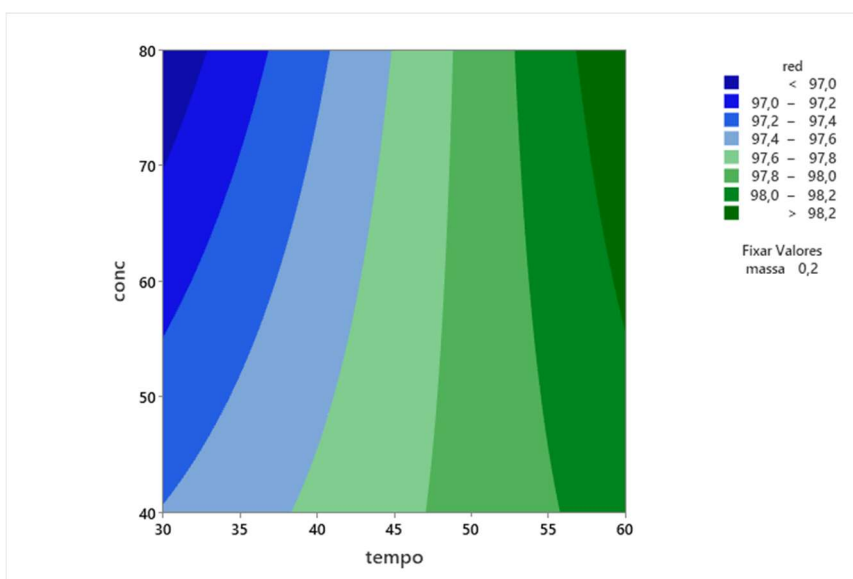
Figura 8 – Gráfico de contorno para variável dependente %RED analisando as interações entre massa do adsorvente e concentração do corante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 9, observa-se que com o aumento tanto do tempo de contato quanto da concentração do corante, leva a maiores reduções de concentração do corante.

Figura 9 – Gráfico de contorno para variável dependente %RED analisando as interações entre tempo de contato e concentração do corante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Diante as análises estatísticas, foi possível estabelecer um modelo matemático linear que simula a influência das variáveis QT e RED%, que são mostrados nas equações abaixo:

$$QT = - 0,306 + 2,85 x_1 + 0,31393 x_2 + 0,00492 x_3 - 0,8041 x_1x_2 - 0,0545 x_1x_3 + 0,000196 x_2x_3$$

$$\%RED = 92,38 + 28,22 x_1 - 0,0158 x_2 + 0,0519 x_3 - 0,0923 x_1x_2 - 0,281 x_1x_3 + 0,000681 x_2x_3$$

Onde:

x_1 – Massa do adsorvente

x_2 – Concentração do corante

x_3 – Tempo de contato

4. CONCLUSÃO

Os ensaios de adsorção foram avaliados a partir da influência da massa do bioadsorvente (borra de café), da concentração do corante (azul de Metileno) e do tempo de contato entre o adsorvente e o adsorvato nas variáveis quantidade de corante adsorvido por unidade de adsorvente (QT) e na porcentagem de redução de corante têxtil (RED%).

Diante dos resultados obtidos, se observa um valoroso potencial do material borra de café como adsorvente para remoção do corante têxtil azul de metileno. Sendo assim, para redução e quantidade de corante adsorvida, os valores foram satisfatórios, possuindo a adsorção mais eficiente no experimento com alta concentração de corante e maior tempo de contato e valores menores de massa do adsorvente, como foi observado nos gráficos e figuras, resultando nos melhores valores em QT de 19,6308 mg/g e redução do corante 98,15%. Conclui-se que, a borra de café, sob condições utilizadas nessa pesquisa experimental, se mostrou um adsorvente de alta eficiência na adsorção do corante Azul de Metileno.

Dessa forma, a utilização desse bioadsorvente para remoção de corantes na indústria têxtil é de válida opção, pois o mesmo mostrou bons resultados neste experimento, dentro da faixa de fatores na qual ele foi submetido, contribuindo com os custos, por se tratar de um adsorvente de menor valor, e por estar disponível em maior escala nas indústrias, na qual muitas vezes é descartado.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, C.L.; CORREA, V.H.M.; SANTOS, R.F.; MARANGONI, Cintia. **ADSORÇÃO DE CORANTES DISPERSOS COM DIFERENTES ADSORVENTES**. Págs. 76-83, cap.6; publicado em outubro de 2020.

CHOONG, J. **Adsorption of silver ions from industrial wastewater using waste coffee grounds**. Korean Journal of Chemical Engineering. v. 34, p. 384- 391, 2017. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s11814-016-0253-9>>. Acesso em: 22 maio 2020.

LERMEN, A. M.; FRONZA, C. S.; DIEL, J. C.; SCHEIN, D.; CLERICI, J. N.; GUIMARÃES, R. E.; BOLIGON, D. S. **A utilização de resíduos agroindustriais para adsorção do corante azul de metileno: uma breve revisão**. Brazilian Applied Science Review, v.5, n.1, p.273-288, 2021. DOI: <https://doi.org/0.34115/basrv5n1-017>.

LUZ, Solimar. **Indústria da moda é a segunda mais poluidora do mundo, aponta estudo**. Rádio Agência. Publicado em 14 de outubro de 2022, no Rio de Janeiro.

MARTINAZZO, Ana P.; CORRÊA, Paulo C.; RESENDE, Osvaldo; MELO, Evandro de C. **Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.11, n.3, p.301–306, 2007.

MARTINS, J.P.; MARCEDO, L.N.C.; FONSECA, V.J.N.; LIMA, M.M.J. **ESTUDO DA CAPACIDADE ADSORTIVA DA BORRA DE CAFÉNO TRATAMENTO DE ÁGUA**. Revista mundo tecnológico, v13, n15, artigo 04. Publicado em março de 2022.

NASCIMENTO, K. K. R.; VIEIRA, F. F.; XAVIER, C. S. F.; ALMEIDA, M. M.; OLIVEIRA, I. V. C.; BANDEIRA, A. A. S.; NETA, O. P. L. **Remoção de glifosato em carvão ativado: planejamento fatorial para otimização de parâmetros**. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v.16, n.12, p. 32050-32064, 2023.

OLIVEIRA, Claudiane Felis Carneiro de. **Avaliação do uso da vagem da algaroba (Prosopis Juliflora), como adsorvente para a remoção de corantes têxteis, presentes em águas residuárias**. 2023. 22 f. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2023.

QUITINO, M.S. **UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CAFÉ PARA REMOÇÃO ADSORTIVA DE CORANTES EM SOLUÇÃO AQUOSA**. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Process**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

SILVA, J. R. R.; GAVAZZONI, L.; FERREIRA, A. P.; BERSANETTE G. D., PERALTA R. M.; **Biorremediação e biodegradação de efluentes têxteis (corantes 22 sintéticos)**. In: PERALTA, R. M. (org.). Biodegradação e Biorremediação: ênfase em bactérias e fungos. 2022. cap. 6, p. 93-113.

SOARES, B. E. G. **Valorização de Subprodutos Industriais por Oxipropilação**. 2011. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de Aveiro, Portugal, 2011.

TÊXTIL E CONFECÇÃO, Abit. **Perfil do Setor**. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. Atualizado em fevereiro de 2024. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor> .

TOTVS, equipe. **Qual é a força da indústria têxtil no Brasil? Conheça importância e a tecnologia do setor**. Atualizado em 21 fevereiro, 2023. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-varejista/industria-textil-no-brasil/> .

XAVIER, CSF; VIEIRA, FF.; ALVES, MP.; SOUSA, JT de. **Utilização do bagaço de cana-de-açúcar na adsorção de corantes têxteis em soluções aquosas**. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, v. 10, n. 7, p. e59110716974, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.16974.

XAVIER, C. S. F.; VIEIRA, F. F.; BANDEIRA, A. A. S.; NASCIMENTO, K. K. R.; ALMEIDA, M. M.; NETA, O. P. L.; OLIVEIRA, I. V. C. **Tratamento de ambientes aquáticos: revisão sobre a adsorção de herbicida glifosato**. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v.16, n.12, p.31935-31955, 2023.

XAVIER, V. F.; FERRI, J. F. C.; CHIARI, E. C. S.; MAINTINGUER, S. I.; **O uso sustentável da água: a produção mais limpa em uma indústria têxtil do estado de São Paulo**. Revista Brasileira Multidisciplinar, v. 22, n. 3, p. 119-143, 2019.