

Potencial de adsorção da alga *Sargassum* sp. na descontaminação ambiental

Adsorption potential of alga Sargassum sp. in environmental decontamination

- **Data de entrada:**
18/02/2021
- **Data de aprovação:**
17/05/2023

Lais Montenegro Teixeira^{1*} | Fernando Fernandes Vieira¹ | Marcello Maia de Almeida¹ | Lucas dos Santos Sousa¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.029>

ORCID ID

Teixeira LM  <https://orcid.org/0000-0001-8146-5982>
Vieira FF  <https://orcid.org/0000-0002-1823-6236>

Almeida MM  <https://orcid.org/0000-0001-7889-126X>
Sousa LS  <https://orcid.org/0000-0001-7301-6108>

Resumo

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento da cinética de secagem em estufa de circulação de ar forçada da alga *Sargassum* sp. em temperaturas de 60 a 80 °C e seu potencial como adsorvente na remoção do corante azul de metileno em um efluente têxtil sintético (ETS). Foi aplicado o planejamento fatorial 2³ para o processo de adsorção com as seguintes variáveis independentes: massa de adsorvente, concentração de corante e tempo de contato, sendo avaliadas as respostas de redução na concentração de corante (% R) e de quantidade adsorvida (qt). O percentual de umidade da massa da alga *Sargassum* sp. foi de 84,47%. Para a temperatura de secagem de 60 °C, o modelo que obteve o melhor ajuste aos dados experimentais foi o modelo de Midili, e o modelo que obteve o melhor ajuste para os dados da temperatura de secagem de 80 °C foi o logarítmico. O melhor resultado em relação à variável qt foi de 231,90 mg g⁻¹, e o melhor resultado para a variável resposta % R obteve um valor de 93,31%. O modelo de pseudo-segunda ordem obteve o melhor ajuste aos dados experimentais de cinética, com R² de 0,99. O adsorvente produzido a partir da alga *Sargassum* sp. teve resultados satisfatórios no estudo do planejamento experimental e da cinética de adsorção, apresentando eficiência na redução do corante azul de metileno em ETS.

Palavras-chave: Cinética de adsorção. Cinética de secagem. Azul de metileno.

Abstract

The objective of this work was to analyze the behavior of drying kinetics in forced air circulation kiln of Sargassum sp. algae at temperature of 60 to 80 °C and its potential as an adsorbent in the removal of the methylene blue dye in a synthetic textile effluent (STE). Factor design 2³ was applied for the adsorption process with the following independent variables: adsorbent mass, dye concentration, and contact time, and the responses of reduction in dye concentration (% R) and adsorbed quantity (qt) were evaluated. The moisture percentage of the Sargassum sp. Algae was 84.47%. For the drying temperature of 60 °C, the model that obtained the best adjustment to the experimental data was the Midili model, and the model that obtained the best adjustment for the drying temperature data of 80 °C was the logarithmic model. The best result regarding the variable qt was of 231.90 mg g⁻¹, and the best result for the response variable % R was of 93.31%. The pseudo-second order

¹ Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) – Campina Grande – Paraíba – Brasil

* **Autora correspondente:** laismontenegrot@gmail.com.

model obtained the best fit to experimental kinetic data, with R^2 of 0.99. The adsorbent produced from the *Sargassum* sp. showed satisfactory results in the study of experimental planning and of adsorption kinetics, showing efficiency in reducing the methylene blue dye in STE.

Keywords: Adsorption kinetics. Drying kinetics. Methylene blue.

1 INTRODUÇÃO

Conceitua-se poluição como qualquer alteração no ambiente que possa gerar impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente, ocasionando alteração na dinâmica dos ecossistemas. A contaminação da água a partir do descarte inadequado de efluentes industriais é um sério problema enfrentado pela sociedade que traz consigo altos riscos à homeostase ambiental. Efluentes que contêm corantes podem inibir a atividade fotossintética na biota aquática, uma vez que esses compostos podem ser bioacumulativos e apresentar efeitos mutagênicos, além de provocar alterações no aspecto visual dos mananciais (Santos *et al.*, 2018).

A adsorção é um dos métodos mais investigados e amplamente utilizados para a remoção de poluentes de águas residuais devido à facilidade de operação, à viabilidade econômica e à alta eficiência (Bhatnagar; Anastopoulos, 2017). É uma operação de transferência de massa que estuda a habilidade de certos sólidos de concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos seus componentes. A espécie que se acumula na interface do material é denominada de adsorvato, e a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula é chamada de adsorvente (Nascimento *et al.*, 2014).

A utilização da tecnologia com biomassa de algas marinhas para processos de adsorção é uma opção viável devido ao baixo custo (Flores-Chaparro *et al.*, 2017) e à alta capacidade de adsorção. Além disso, o processo de biossorção através de algas é considerado simples, com pouca geração de resíduos, fácil operação e possibilidade de regeneração do

adsorvente (Yi *et al.*, 2016). A biomassa marinha está atraindo muita atenção nos últimos anos, e, como os oceanos cobrem mais de 70% da superfície do nosso planeta, a atenção tem sido direcionada para a utilização de recursos marítimos (Qin, 2018).

As algas marinhas são encontradas em ambientes costeiros e são abundantes onde há substrato disponível. Eventualmente algumas destas macroalgas podem ser arrancadas de seus substratos, depositando-se nas praias e, constituindo o que se denomina de algas marinhas arribadas. Entre estas, destacam-se a *Sargassum* sp. (*Ochrophyta*) e a *Ulva* sp. (*Chlorophyta*) pela grande biomassa apresentada (Kirkman; Kendrick, 1997).

Visando à otimização do processo de biossorção das algas dos compostos coloridos, é realizada a secagem desse material. A secagem é talvez a operação unitária mais antiga e mais comum encontrada em vários setores industriais, sobretudo nas indústrias química, farmacêutica, de papel, mineral, polimérica, cerâmica, têxtil, alimentícia e agrícola. É também um dos processos mais complexos que envolvem o transporte simultâneo e acoplado de calor, massa e momento em um meio de matéria (Barbosa de Lima *et al.*, 2016).

A secagem tem a finalidade de eliminar um líquido volátil contido num corpo não volátil, através de evaporação, que, no caso em estudo, ocorrerá pela evaporação da água do material biológico. Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor da água, formado a partir da superfície do material a ser secado. É este processo de forne-

cimento de calor da fonte quente para o material úmido que promoverá a evaporação da água do material, e, em seguida, a transferência de massa arrastará o vapor formado (Park *et al.*, 2007).

A simulação da secagem ou mesmo a obtenção de variáveis físicas que visam explicar esse processo é feita por meio do ajustamento de modelos matemáticos que descrevam a variação do teor de água em relação ao tempo (Resende *et al.*, 2019).

Nesse contexto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o potencial de produção de um adsorvente obtido por meio do processo de secagem da alga *Sargassum* sp., que se desprende do substrato pela força das correntes, ficando disposta na linha de praia durante a maré baixa, como alternativa de tratamento de corantes oriundos de efluentes têxteis. O corante utilizado nesse trabalho para a aplicação do adsorvente foi o azul de metileno. Essa técnica de adsorção torna-se uma estratégia atraente e viável por apresentar um baixo custo e promover a minimização dos problemas ambientais.

2 METODOLOGIA

Os procedimentos experimentais desse estudo foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), na cidade de Campina Grande (PB). A matéria-prima, a alga *Sargassum* sp., utilizada nos ensaios experimentais foi coletada no litoral da praia de Tambaú, em João Pessoa (PB), como apresentada na Figura 1.

A solução do efluente têxtil sintético (ETS) foi preparada de acordo com a metodologia proposta por Mo *et al.* (2007), como segue: adição do corante têxtil azul de metileno com uma concentração de 1.000 mg.L⁻¹; álcool polivinílico (PVA) a uma concentração de 500 mg.L⁻¹; cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 250 mg.L⁻¹; e sulfato de sódio (Na₂SO₄) a uma concentração de 750 mg.L⁻¹. Após a devida preparação, o ETS foi solubilizado

por agitação em béquer de 1.000 mL, utilizando agitadores magnéticos.



Figura 1 – Alga *Sargassum* sp.

A secagem foi realizada em uma estufa com circulação de ar forçada de modelo SolidSteel Estufa Digital Timer SSD, com velocidade de 1,5 m.s⁻¹, nas temperaturas de 60 e 80° C, até que o material apresentasse uma massa constante.

Para a determinação da umidade inicial do material, três amostras de 2 g cada foram pesadas em balança analítica e levadas para o medidor de umidade Marte ID-200, com fonte de calor infravermelho produzido por resistência encapsulada em quartzo e display LCD matriz de pontos iluminados.

Para a construção das curvas de secagem, foi realizado o monitoramento da variação do peso das amostras em função do tempo até o tempo analisado em que a alga apresentou o peso constante. O monitoramento foi realizado com massa da alga *in natura* de 200 g em cada bandeja, conforme os intervalos descritos na Tabela 1. As pesagens foram realizadas em balança analítica, e o processo foi feito em triplicata. Após o período de monitoramento, as amostras ficaram na estufa até completar 24 horas.

Após a coleta dos dados, foram construídas as curvas de secagem e de taxa de secagem. A primeira foi obtida a partir do gráfico de umidade adimensional em função do tempo. A umidade em base seca em cada instante foi obtida a partir da Equação 1.

Tabela 1 – Intervalos de pesagem da amostra da alga *Sargassum* sp.

| Tempo de monitoramento (min) | Intervalo de pesagem |
|------------------------------|----------------------|
| $t < 60$ | A cada 5 min |
| $60 < t < 120$ | A cada 10 min |
| $120 < t < 180$ | A cada 15 min |
| $t > 180$ | A cada 30 min |

$$(1) \quad X_{bs} = \frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{seca}}$$

Em que X_{bs} é a razão entre a massa de água presente na amostra ($M_{úmida} - M_{seca}$) e a massa de sólido isenta desta umidade (M_{seca}), em um determinado tempo. $M_{úmida}$ é a massa da amostra, em grama (alga *in natura*), antes de ser submetida à secagem na estufa, e M_{seca} é a massa seca, em grama, obtida em estufa após secagem (alga seca).

Segundo McCabe, Trevino e Butterfield (1993), para estudar a operação de secagem, pode-se obter a curva que relaciona a variação adimensional de umidade X_r (que pode ser calculada pela Equação 2) em função do tempo, em que X_0 é o teor de umidade inicial.

$$(2) \quad X_r = \frac{X_{bs} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$$

Para a determinação do teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}), utilizou-se a razão entre a massa úmida ($M_{úmida}$) e a massa seca (M_{seca}). A X_{eq} considerada para o cálculo do teor de umidade do produto (X_r) foi estimada quando a razão $M_{úmida}/M_{seca}$ se tornava constante. Desta forma, para cada condição de secagem, a amostra apresentava um teor de umidade de equilíbrio equivalente.

Os dados experimentais foram ajustados utilizando os seguintes modelos matemáticos: exponencial de dois termos, Henderson e Pabis,

logarítmico, Page, Newton e Midili. Os critérios de escolha do melhor modelo para os modelos cinéticos foram determinados com base nos maiores valores do coeficiente de determinação (R^2) e da análise de variância (teste F).

As análises estatísticas deste trabalho foram feitas pelo software STATISTICA, disponibilizado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA/UEPB).

Os ensaios foram realizados em triplicata. As características das amostras da alga utilizadas nos ensaios de adsorção foram determinadas de acordo com o planejamento experimental apresentado na Tabela 2. Cada amostra *in natura* foi levada ao agitador orbital e, após o intervalo de tempo predeterminado no planejamento, foi retirada e filtrada, e o material sobrenadante foi centrifugado, e através da leitura de absorbância em espectrofotômetro foi determinada a concentração de corante remanescente.

O planejamento experimental é do tipo 2^3 , sendo avaliadas as influências da massa do adsorvente e do tempo de contato e a concentração do ETS para um volume de 100 mL de solução de ETS, de acordo com os valores descritos no Tabela 3.

A eficiência de adsorção da alga foi medida através do percentual de redução (% R) e da quantidade adsorvida (qt) do corante, sendo estas as variáveis de resposta dos experimentos. A porcentagem de redução foi obtida utilizando a Equação 3.

Tabela 2 – Matriz com os valores codificados do planejamento fatorial 2^3 para amostra *in natura*.

| Experimento | Massa (g) | Concentração (mg.L ⁻¹) | Tempo (min) |
|-------------|-----------|------------------------------------|-------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | 1 | -1 | -1 |
| 3 | -1 | 1 | -1 |
| 4 | 1 | 1 | -1 |
| 5 | -1 | -1 | 1 |
| 6 | 1 | -1 | 1 |
| 7 | -1 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 |

Tabela 3 – Variáveis do planejamento experimental 2^3 .

| Fatores | Níveis | | |
|------------------------------------|--------|-----|-----|
| | -1 | 0 | 1 |
| Massa (g) | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| Concentração (mg.L ⁻¹) | 100 | 200 | 300 |
| Tempo de contato (min) | 10 | 20 | 30 |

$$(3) \quad \%R = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) * 100$$

A quantidade de corante adsorvido por massa adsorvente foi calculada por meio da Equação 4:

$$(4) \quad qt = \left(\frac{C_o - C_f}{m} * V \right)$$

Em que:

Co: concentração da solução inicial do corante (mg.L⁻¹);

Cf: concentração final do corante após um determinado tempo (mg.L⁻¹);

m: massa do adsorvente (g);

V: volume do adsorvato (L).

Com o objetivo de obter as curvas cinéticas, os ensaios foram realizados com a condição que teve melhor resposta no planejamento experimental quanto à variável de resposta da quantidade de corante adsorvido por massa adsorvente. Os frascos de Erlenmeyer que continham 100 mL da melhor condição obtida pela análise do planejamento experimental foram colocados sob agitação de 120 rpm durante uma hora. Amostras líquidas foram retiradas e separadas da fase sólida por meio de peneiras. O material sobrenadante foi, então, centrifugado a uma velocidade de rotação de 2.000 rpm durante 20 minutos para a sedimentação dos sólidos em suspensão. A concentração remanescente de cada amostra foi determinada por meio da leitura de absorbância em espectrofotômetro.

Para representar a cinética de adsorção dos ensaios experimentais, que visou avaliar o qt em função do tempo, os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e equação de Elovich. Os parâmetros dos modelos foram estimados a partir do software STATISTICA.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cinética de secagem da alga *Sargassum sp.*

A média de umidade inicial em base seca da alga *Sargassum sp.* foi de 31,06 gH₂O/g sólidos secos. A umidade do resíduo em base úmida representa 84,47% de sua massa total.

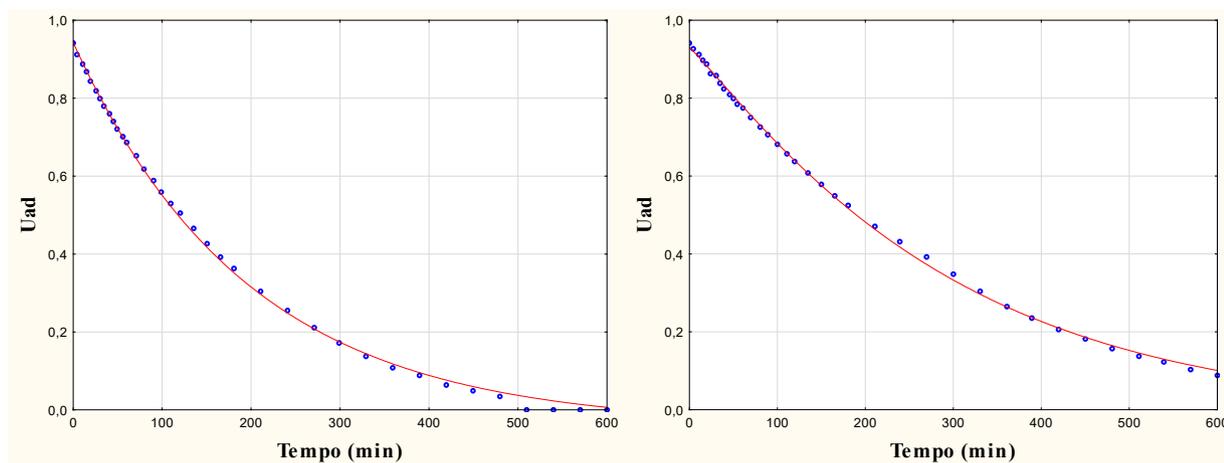


Figura 2 – Ajuste dos modelos dos dados experimentais da secagem (à esquerda) 60° C - Midili; e (à direita) 80° C - logarítmico.

Tabela 4 – Comparação dos parâmetros estatísticos dos modelos de secagem a 60° C.

| Modelo | a (adm) | b (min ⁻¹) | c (adm) | k (min ⁻¹) | n (adm) | Fcal | Ftab | Teste F | R ² |
|---------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|-----------|------|-----------|----------------|
| Exp. de dois termos | 1,0000 | - | - | 0,0100 | - | 116,48 | 3,25 | 35,82 | 0,9477 |
| Page | - | - | - | 0,0055 | 0,9323 | 13.380,02 | 3,25 | 4.114,49 | 0,9971 |
| Midili | 0,9299 | -0,000006 | - | 0,0020 | 1,0977 | 62.201,51 | 2,64 | 23.548,11 | 0,9997 |
| Logarítmico | 0,9792 | - | -0,0297 | 0,0033 | - | 42.965,33 | 2,87 | 14.990,00 | 0,9994 |
| Henderson e Pabis | 0,9541 | - | - | 0,0035 | - | 43.514,83 | 3,25 | 13.381,26 | 0,9991 |
| Newton | - | - | - | 0,0038 | - | 21.373,36 | 4,10 | 5.215,34 | 0,9962 |

Tabela 5 – Comparação dos parâmetros estatísticos dos modelos de secagem a 80° C.

| Modelo | a (adm) | b (min ⁻¹) | c (adm) | k (min ⁻¹) | n (adm) | Fcal | Ftab | Teste F | R ² |
|---------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|-----------|------|----------|----------------|
| Exp. de dois termos | 1,1770 | - | - | 0,0621 | - | 7046,99 | 3,25 | 2167,02 | 0,9963 |
| Page | - | - | - | 0,0074 | 0,9589 | 7.588,325 | 3,25 | 2.333,49 | 0,9966 |

continua...

Tabela 4 – Continuação...

| Modelo | a (adm) | b (min ⁻¹) | c (adm) | k (min ⁻¹) | n (adm) | Fcal | Ftab | Teste F | R ² |
|-------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|-----------|------|----------|----------------|
| Midili | 0,9177 | -0,000013 | - | 0,0028 | 1,1211 | 16.530,73 | 2,64 | 6.258,17 | 0,9993 |
| Logarítmico | 0,9828 | - | -0,04 | 0,0051 | - | 20.946,10 | 2,87 | 7.307,80 | 0,9992 |
| Henderson e Pabis | 0,9527 | - | - | 0,0056 | - | 14.821,15 | 3,25 | 4.557,66 | 0,9982 |
| Newton | - | - | - | 0,0060 | - | 14.459,16 | 4,10 | 3.528,20 | 0,9963 |

Entre os modelos aplicados, verificou-se um bom ajuste dos dados experimentais aos modelos de Midili e logarítmico nas temperaturas de 60 e 80° C, respectivamente, como apresentados na Figura 2. Já as tabelas 4 e 5 apresentam a comparação dos parâmetros estatísticos analisados e calculados dos modelos de secagem.

A análise estatística realizada para os modelos de secagem corroboraram o comportamento apresentado pelos ajustes feitos nos modelos experimentais apresentados na Figura 2. Os que apresentaram maiores valores do coeficiente de determinação (R²), assim como maiores valores no teste F, foram utilizados como critério de escolha para representar o melhor modelo a ser aplicado aos dados experimentais.

Para a temperatura de secagem de 60° C, o modelo que obteve o melhor ajuste aos dados experimentais foi o modelo de Midili, com teste F de 23548,11 e R² de 0,99, e o modelo que obteve o melhor ajuste para os dados da temperatura de secagem de 80° C foi o logarítmico, com teste F de 7.307,80 e R² de 0,99. Pode-se observar que o parâmetro k dos modelos apresentados aumentou com a elevação da temperatura, visto que quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior será a facilidade do produto de perder água livre. O mesmo fato ocorreu com o parâmetro n. Os parâmetros a e b não têm significado físico no processo de secagem, uma vez que são constantes do modelo.

De acordo com Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001), o modelo pode ser considerado estatisticamente significativo se o F calculado (Fcal) for maior que o F tabelado (Ftab), e preditivo se essa relação for superior a 10. Portanto, todos os modelos apresentaram um bom ajuste para ambas as temperaturas, sendo considerados modelos estatisticamente significativos e preditivos, com intervalo de confiança de 95%.

Ahmad *et al.* (2012) avaliaram a secagem de algas marinhas marrons em três temperaturas de ar de secagem, 40, 50 e 60° C, e a velocidade do ar foi mantida constante em 1 m.s⁻¹. O modelo de Page apresentou um melhor ajuste aos dados experimentais, com R² de 0,99 para as temperaturas de secagem estudadas. Observou-se que o valor dos parâmetros k e n dos modelos de secagem aumentou proporcionalmente à temperatura de secagem.

Portanto, no estudo da secagem da alga *Sargassum* sp. é possível afirmar que as temperaturas avaliadas de 60 e 80° C são indicadas para o processo de secagem, por isso a temperatura de 60° C é a mais indicada para a obtenção do material seco, uma vez que necessita de uma quantidade menor de energia no processo.

Portanto, no estudo da secagem da alga *Sargassum* sp. é possível afirmar que as temperaturas avaliadas de 60 e 80° C são indicadas para o processo de secagem, por isso a temperatura de 60° C é a mais indicada para a obtenção do material seco, uma vez que necessita de uma quantidade menor de energia no processo.

3.2 Análise do planejamento experimental

Para analisar a influência das variáveis independentes sobre as respostas qt e a redução da concentração em percentual (% R), foi feito o planejamento experimental encontrado na Tabela 6 para a alga seca a 60° C e as respostas obtidas.

Os resultados para o percentual de redução do planejamento obtiveram valores acima de 75%,

indicando uma boa redução de corante nas concentrações analisadas do ETS. Com exceção das condições 1 e 3, que apresentaram valores menores de 63,64% e 51,50%, respectivamente. O melhor resultado para a resposta % R foi apresentado pelo experimento 8, obtendo um valor de 93,31% de redução de corante.

Os resultados para a resposta qt do planejamento também foram satisfatórios, apresentando uma boa quantidade adsorvida de corante nos tempos analisados, principalmente no tempo de 30 minutos, apresentando resultados melhores em comparação ao tempo de 10 minutos. Observa-se que o experimento 7 obteve a maior resposta em

relação à variável analisada qt, apresentando um valor de 231,9059 mg.g⁻¹.

Mokhtar *et al.* (2017) avaliaram o potencial de remoção do corante azul de metileno através de cinco espécies de macroalgas marinhas (*S. polycystum*, *E. spinosum*, *K. striatum*, *K. alvarezii* e *C. lentillifera*), obtendo uma remoção de máxima de 84%, ao utilizar a *Eucheuma spinosum* em condições de operação otimizadas.

Os gráficos de Pareto, indicados na Figura 3, apresentam as influências das variáveis independentes (massa, concentração e tempo de contato) nas variáveis de respostas redução e qt.

Tabela 6 – Planejamento fatorial 2³ e as variáveis de resposta.

| Experimento | Mads (g) | C ₀ (mg.L ⁻¹) | Tempo (min) | % R | qt (mg.g ⁻¹) |
|-------------|----------|--------------------------------------|-------------|-------|--------------------------|
| 1 | 0,1 | 100 | 10 | 63,65 | 63,6461 |
| 2 | 0,3 | 100 | 10 | 84,84 | 28,2811 |
| 3 | 0,1 | 300 | 10 | 51,50 | 154,5010 |
| 4 | 0,3 | 300 | 10 | 75,96 | 75,9586 |
| 5 | 0,1 | 100 | 30 | 81,80 | 81,8045 |
| 6 | 0,3 | 100 | 30 | 91,92 | 30,6405 |
| 7 | 0,1 | 300 | 30 | 77,30 | 231,9059 |
| 8 | 0,3 | 300 | 30 | 93,31 | 93,3172 |
| 9 | 0,2 | 200 | 20 | 87,25 | 87,2520 |
| 10 | 0,2 | 200 | 20 | 85,19 | 85,1953 |
| 11 | 0,2 | 200 | 20 | 85,89 | 85,8902 |

Todas as variáveis independentes e as interações entre massa de adsorvente e tempo e entre concentração e tempo são estatisticamente significativas ao intervalo de confiança de 95% para a redução. Já para a variável qt, todas as variáveis independentes e as interações entre massa de adsorvente e concentração, massa de adsorvente e tempo e concentração e tempo são estatisticamente significativas ao intervalo de confiança de 95%.

Os efeitos observados na Figura 3 com valores negativos indicam que as variáveis independentes apresentam efeitos negativos, o que implica dizer que o aumento dos valores dessas variáveis acarreta a diminuição da variável dependente (% R e qt). Por sua vez, os efeitos com valores positivos representam efeitos positivos, ou seja, quanto maior os valores das variáveis independentes, maior os valores das variáveis dependentes.

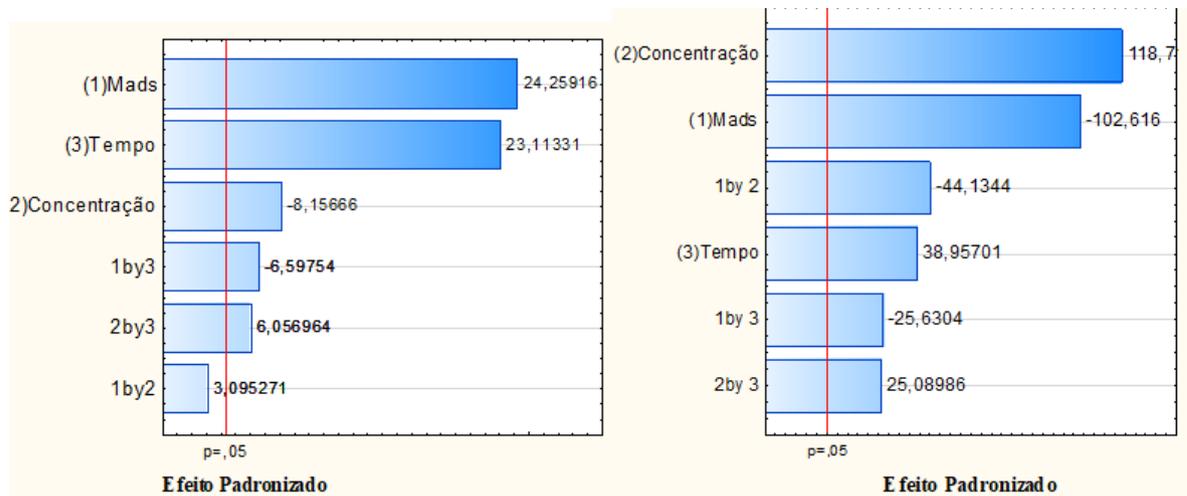


Figura 3 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta (à esquerda) % R e (à direita) qt.

De acordo com o planejamento experimental feito por Moghazy, Labena e Husien (2019), utilizando as biomassas de *Ulva fasciata* e *Sargassum dentifolium* como bioadsorventes para remoção de azul de metileno (328 mg.L^{-1} de concentração) das águas residuais, os principais efeitos da *Ulva* demonstraram que o tempo e a massa de bioadsorvente tiveram um efeito positivo na

bioadsorção e as concentrações de pH e azul de metileno tiveram um efeito negativo. A *Ulva fasciata* obteve a maior capacidade de adsorção de 97%, o *Sargassum dentifolium* de 85,6% de redução, com R^2 de 0,98.

Os gráficos de contorno indicados na Figura 4 relacionam a influência das variáveis de concentração e massa para as respostas de redução e qt.

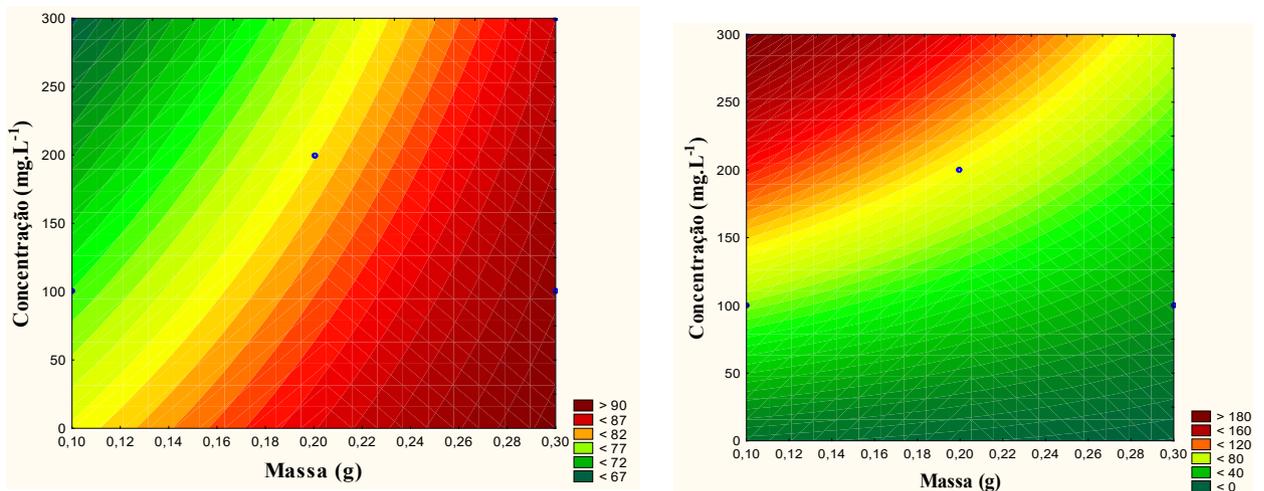


Figura 4 – Gráficos de contorno das variáveis independentes nas variáveis de resposta (à esquerda) redução e (à direita) qt.

Observa-se que, para a resposta q_t , quanto maior for a massa de adsorvente utilizada no processo de adsorção, menor é a quantidade adsorvida; e quanto maior for a concentração do corante na solução, maior será o valor de q_t ; e independentemente da concentração do corante utilizada na solução, a maior redução ocorre em uma quantidade maior de massa.

3.3 Modelagem da cinética de adsorção

Para compreender os mecanismos que controlam a cinética de adsorção, como a transferência de massa da solução e reação química, foram uti-

lizados os modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e a equação de Elovich para a modelagem dos dados experimentais. Na Figura 5 se encontram os ajustes dos modelos aos dados experimentais do material seco *in natura*.

Nas tabelas 7 e 8 são apresentados os valores experimentais e estimados pelos modelos avaliados para o material seco. Na Tabela 9 são apresentadas análises de variância, coeficientes de determinação, F_{cal} , F_{tab} e teste F para todos os modelos avaliados na cinética de adsorção.

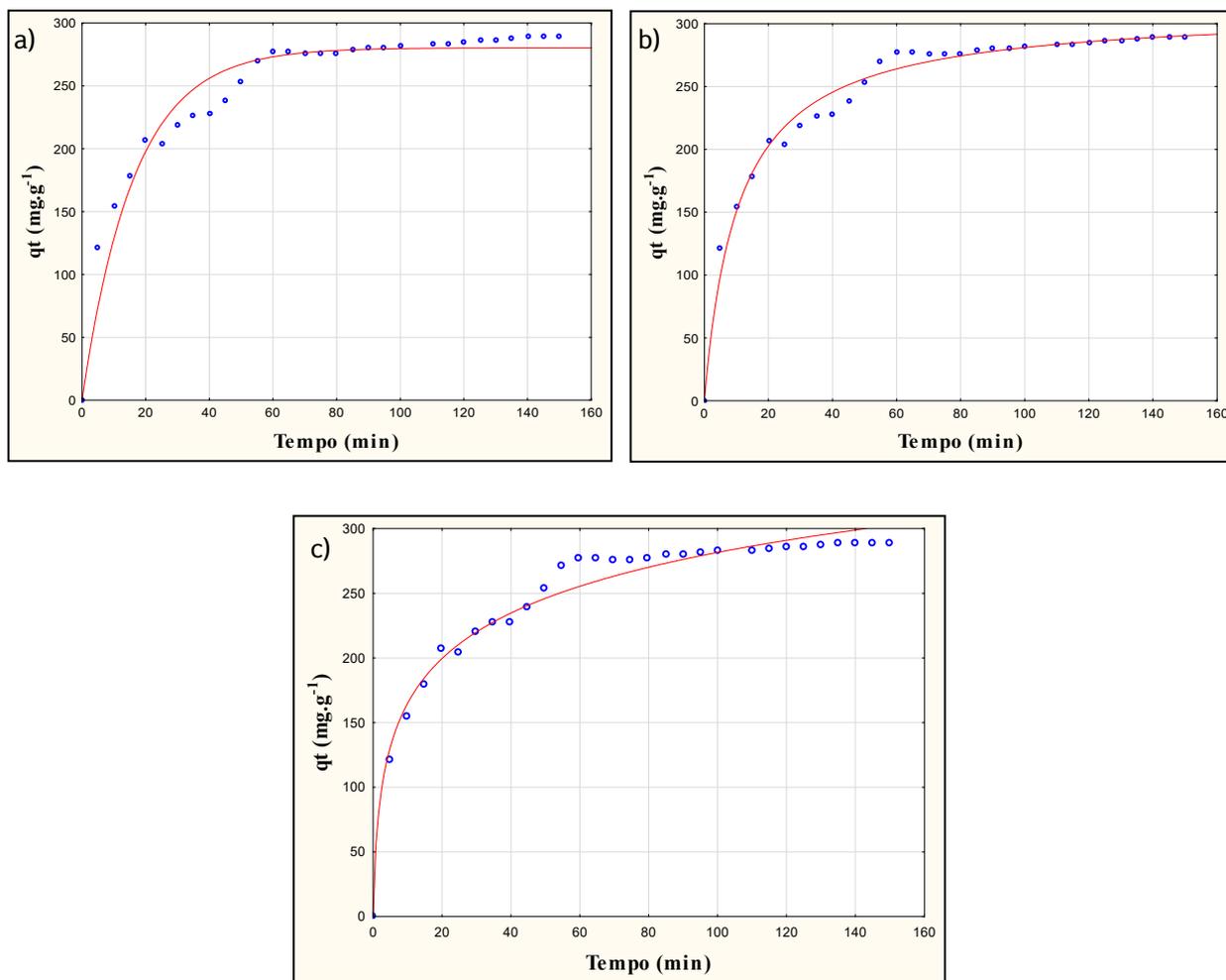


Figura 5 – Ajuste dos modelos para o material seco *in natura*: (a) pseudo-primeira ordem; (b) pseudo-segunda ordem; (c) equação de Elovich.

Tabela 7 – Parâmetros estimados para os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

| Modelos | q_{e_exp} (mg.g ⁻¹) | q_{e_cal} (mg.g ⁻¹) | k |
|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| Pseudo-primeira ordem | 289,24752 | 280,3122 | 0,0611 min ⁻¹ |
| Pseudo-segunda ordem | 289,24752 | 311,0972 | 0,0003 g.mg ⁻¹ .min ⁻¹ |

Tabela 8 – Parâmetros estimados pela equação de Elovich.

| Modelo | q_{e_exp} (mg.g ⁻¹) | (mg.g ⁻¹ .min ⁻¹) | (mg.g ⁻¹) |
|--------------------|------------------------------------|--|-----------------------|
| Equação de Elovich | 289,24752 | 52,66000 | 0,04463 |

Tabela 9 – Análise de variância para os modelos cinéticos aplicados aos ensaios de adsorção.

| Modelos | Fonte de variação | Soma dos Quadrados | GL | Média Quadrática | Fcal | Ftab | Teste F | R ² |
|-----------------------|-------------------|--------------------|------|------------------|-----------|--------|------------|----------------|
| Pseudo-primeira ordem | Regressão | 1.932.874 | 2,0 | 966.437,2 | 4.469,181 | 3,3404 | 1.337,9238 | 0,9742 |
| | Residual | 6.055 | 28,0 | 216,2 | | | | |
| | Total | 1.938.929 | 30,0 | | | | | |
| Pseudo-segunda ordem | Regressão | 1.937.087 | 2,0 | 968.543,3 | 14.718,85 | 3,3404 | 4.406,3325 | 0,9922 |
| | Residual | 1.842 | 28,0 | 65,8 | | | | |
| | Total | 1.938.929 | 30,0 | | | | | |
| Equação de Elovich | Regressão | 1.936.366 | 2,0 | 968.183,2 | 10.578,40 | 3,3404 | 3.166,8188 | 0,9891 |
| | Residual | 2.563 | 28,0 | 91,5 | | | | |
| | Total | 1.938.929 | 30,0 | | | | | |

Todos os modelos apresentaram um R² acima de 0,97 e Fcal maior do que Ftab, comprovando que são considerados modelos estatisticamente significativos dentro do intervalo de confiança de 95%. No entanto, o modelo de pseudo-segunda ordem se destaca, apresentando o maior valor do coeficiente de determinação.

Moghazy, Labena e Husien (2019) utilizaram a biomassa seca microtriturada de duas espécies de macroalgas, *Ulva fasciata* e *Sargassum dentifolium*, como bioadsorventes para a remoção de

azul de metileno das águas residuais. O material bioadsorvente *Ulva fasciata* obteve a maior capacidade de adsorção (97%) em comparação com o *Sargassum dentifólio*, que alcançou 85,6% de adsorção. Além disso, os dados cinéticos sugeriram que o processo de adsorção segue o modelo de pseudo-segunda ordem, apresentando um R² de 0,99 e valores calculados (qe) muito próximos dos valores experimentais.

Ahmed *et al.* (2019) utilizaram um adsorvente poroso de alto desempenho, preparado por pirólise

térmica de algas (*Gelidiella acerosa*), na adsorção do corante azul de metileno. O experimento para a adsorção foi conduzido sob concentração inicial de azul de metileno na faixa de 25-400 mg.L⁻¹. O adsorvente exibiu uma alta capacidade de adsorção: 512,67 mg.g⁻¹ de azul de metileno a 30 °C, com o R² de 0,99. O melhor modelo cinético apresentado foi o de pseudo-segunda ordem.

4 CONCLUSÕES

No estudo da secagem da alga *Sargassum* sp., pode-se afirmar que as temperaturas avaliadas, 60 e 80 °C, são eficientes para o processo de secagem. Entre os modelos avaliados para descrever a cinética de secagem, o modelo de Midili e logarítmico obtiveram melhores ajustes e melhores valores de R² e teste F para as temperaturas de 60 e 80 °C, respectivamente.

O planejamento experimental 2³ avaliou os efeitos das variáveis independentes massa, concentração e tempo nas respostas qt e % R, apresentando resultados estatisticamente significativos em todas as variáveis independentes, com intervalo de confiança de 95%. Os melhores valores de R² e teste F para o estudo da cinética de adsorção sugerem que o melhor modelo para descrever os dados cinéticos obtidos foi o de pseudo-segunda ordem.

Pode-se concluir que a eficiência do adsorvente produzido pela alga *Sargassum* sp. foi de boa qualidade, uma vez que no estudo da cinética e no equilíbrio de adsorção os resultados obtidos foram satisfatórios. Portanto, o adsorvente produzido tem potencial de aplicação na descontaminação ambiental de corantes presentes em efluentes têxteis com um baixo custo.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Resumo: Teixeira LM; **Introdução:** Sousa LS; **Metodologia:** Teixeira LM, Vieira FF, Sousa LS; **Resultados e Discussão:** Almeida MM, Vieira, FF, Teixeira LM.

6 REFERÊNCIAS

- AHMAD, K. *et al.* Removal of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Cd, Cu and Fe) in aqueous media by calcium carbonate as an adsorbent. **International Journal of Chemical and Biochemical Sciences**, Faisalabad, v. 2, p. 48-53, 2012.
- AHMED, M. J. *et al.* High-performance porous biochar from the pyrolysis of natural and renewable seaweed (*Gelidiella acerosa*) and its application for the adsorption of methylene blue. **Bioresource Technology**, Barking, v. 278, p. 159-164, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.054>
- BARBOSA DE LIMA, A. G. B. de *et al.* Intermittent drying: Fundamentals, modeling and applications. In: DELGADO, J.; BARBOSA DE LIMA, A. (ed.). **Drying and energy technologies**. Cham: Springer, 2016. v. 63, p. 19-41.
- BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Unicamp, 2001.
- BHATNAGAR, A.; ANASTOPOULOS, I. Adsorptive removal of bisphenol A (BPA) from aqueous solution: A review. **Chemosphere**, Oxford, v. 168, p. 885-902, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.121>
- FLORES-CHAPARRO, C. E. *et al.* Biosorption removal of benzene and toluene by three dried macroalgae at different ionic strength and temperatures: Algae biochemical composition and kinetics. **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 193, p. 126-135, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.005>
- KIRKMAN, H.; KENDRICK, G. A. Ecological significance and commercial harvesting of drifting and beach-cast macro-algae and seagrasses in Australia: A review. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, v. 9, p. 311-326, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1007965506873>
- MCCABE, D. L.; TREVINO, L. K.; BUTTERFIELD, K. D. Academic integrity in honor code and non-honor code environments: A qualitative investigation. **The Journal of Higher Education**, Abingdon, v. 70, n. 2, p. 211-234, 1993. <https://doi.org/10.1080/00221546.1999.11780762>
- MO, J. *et al.* Pretreatment of a dyeing wastewater using chemical coagulants. **Dyes and Pigments**, Londres, v. 72, n. 2, p. 240-245, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2005.08.022>
- MOGHAZY, R. M.; LABENA, A.; HUSIEN, S. Eco-friendly complementary biosorption process of methylene blue using micro-sized dried biosorbents of two macro-algal species (*Ulva fasciata* and *Sargassum dentifolium*): Full factorial design, equilibrium, and kinetic studies. **International Journal of Biological Macromolecules**, Guildford, v. 134, p. 330-343, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.207>
- MOKHTAR, N. *et al.* Biosorption of azo-dye using marine macro-alga of *Eucheima Spinosum*. **Journal of Environmental**

Chemical Engineering, Amsterdã, v. 5, n. 6, p. 5721-5731, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.10.043>

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

QIN, Y. Seaweed bioresources. *In*: QIN, Y. (ed.). **Bioactive seaweeds for food applications**: Natural ingredients for healthy diets. Londres: Academic Press, 2018. p. 3-24.

PARK, K. J. *et al.* **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas: Unicamp, 2007.

RESENDE, K. K. O. *et al.* Cinética de secagem e avaliação físico-química de fruta-pão (*Artocarpus altilis*) variedade

seminífera. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 6, n. 1, p. 74-81, 2019. <https://doi.org/10.32404/rean.v6i1.2665>

SANTOS, C. C. dos *et al.* Chitosan-edible oil based materials as upgraded adsorbents for textile dyes. **Carbohydrate Polymers**, Londres, v. 180, p. 182-191, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.076>

YI, Z.-J. *et al.* Uranium biosorption from aqueous solution onto *Eichhornia crassipes*. **Journal of Environmental Radioactivity**, Barking, v. 154, p. 43-51, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.01.012>