Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação — REASE

doi.org/10.51891/rease.v12i11.32517

REMOÇÃO DOS CORANTES AZUL E VERMELHO S-MATRIX 150 UTILIZANDO CARVÃO DE PROSOPIS JULIFLORA: UMA INVESTIGAÇÃO DOS ASPECTOS CINÉTICOS DE ADSORÇÃO

REMOVAL OF BLUE AND RED S-MATRIX DYES USING PROSOPIS JULIFLORA CHARCOAL: AN INVESTIGATION OF THE KINETIC ASPECTS OF ADSORPTION

Douglas Gabriel Souto Dantas[1]
Marcelo Victor dos Santos Alves[2]

RESUMO: O presente estudo avalia a eficiência do carvão produzido a partir da biomassa de Prosopis juliflora (algaroba) na remoção dos corantes têxteis Azul e Vermelho S-Matrix em meio aquoso. Para isso, foram realizados ensaios de adsorção em batelada, utilizando carvão preparado em forno mufla a 773,14 K, durante três horas. Os experimentos foram conduzidos com soluções dos corantes na concentração de 40 ppm, sob agitação constante.Os dados experimentais foram analisados por meio dos modelos cinéticos de Pseudo-Primeira Ordem, Pseudo-Segunda Ordem, Elovich, Weber-Morris e Boyd, com o objetivo de compreender o comportamento do processo de adsorção e os mecanismos envolvidos. Os resultados mostraram que o corante Azul apresentou maior afinidade pelo adsorvente e melhor desempenho na remoção quando comparado ao corante Vermelho. Entre os modelos avaliados, o de Pseudo-Segunda Ordem apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais para ambos os corantes, sugerindo uma possível contribuição de interações químicas no processo de adsorção.As análises complementares pelos modelos de Weber-Morris e Boyd indicaram que a transferência de massa ocorre por mecanismos combinados, envolvendo tanto a resistência à difusão na camada limite quanto o transporte do adsorvato para o interior dos poros do material. Dessa forma, os resultados demonstram o potencial do carvão obtido a partir da Prosopis juliflora como material adsorvente de baixo custo e uma alternativa promissora e ambientalmente sustentável para a remoção de corantes presentes em efluentes aquosos.

Palavras-chave: Adsorção. Estudo cinético. Modelagem matemática.

ABSTRACT: This study evaluates the efficiency of charcoal produced from Prosopis juliflora (algaroba) biomass in removing the textile dyes "Blue" and "Red" (S-Matrix) from an aqueous medium. Batch adsorption tests were conducted using charcoal prepared in a muffle furnace at 773.14 K for three hours. The experiments were carried out with dye solutions at a concentration of 40 ppm under constant agitation. The experimental data were analyzed using the Pseudo-First-Order, Pseudo-Second-Order, Elovich, Weber-Morris, and Boyd kinetic models to understand the behavior of the adsorption process and the mechanisms involved. The results showed that the "Blue" dye exhibited a higher affinity for the adsorbent and better removal performance compared to the "Red" dye. Among the models evaluated, the Pseudo-Second-Order model provided the best fit to the experimental data for both dyes, suggesting a potential contribution of chemical interactions to the adsorption process. Complementary analyses using the Weber-Morris and Boyd models indicated that mass transfer occurs through combined mechanisms, involving both resistance to diffusion within the boundary layer and the transport of the adsorbate into the material's pores. Thus, the findings demonstrate the potential of charcoal derived from Prosopis juliflora as a low-cost adsorbent material, representing a promising and environmentally sustainable alternative for the removal of dyes present in aqueous effluents.

Keywords: Adsorption. Kinetic study. Mathematical modeling.

[1]Graduando em licenciatura em Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).
[2] Doutor. Professor EBTT, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento industrial juntamente com a busca por melhorias tecnológicas tem feito com que diversos setores mundiais tenham um avança significativo, entretanto, alguns problemas vão de encontro a esses avanços de modo que eles acarretam situações que exigem soluções revolucionarias como forma de minimizar danos e proporcionar remediações mais ecologicamente sustentáveis.

O avanço da indústria têxtil é um ponto importante na economia de inúmeros municípios, porem, quando acidentes envolvendo corantes que fazem parte do processo de produção de malharia ocorrem, os resultados são desastrosos. Pois inúmeros corantes possuem substancias nocivas ao ser humano e ao ecossistema.

Nesse contexto, Guaratini, Zanoni (2000) acrescentam que: os corantes têxteis possuem diferentes classes, mas, vale destacar que algumas classes como: Metálicos, Azóicos entrem outros, são altamente prejudiciais. Os autores indicam essas classes por conta das suas estruturas químicas, os grupos dos corantes metálicos possuem átomos de metais pesados em suas composições, já os corantes azóicos possuem o grupo azo que é cancerígeno.

O descarte inadequado de efluentes contendo esses corantes em corpos d'água receptores acarreta conseqüências desastrosas para os ecossistemas aquáticos. Mesmo em concentrações reduzidas, os corantes afetam severamente a transparência da água, reduzindo a penetração da luz solar e comprometendo diretamente a taxa fotossintética de algas e plantas aquáticas. Além disso, muitos desses compostos e seus subprodutos apresentam elevada toxicidade, potencial mutagênico e carcinogênico, representando uma ameaça direta à biodiversidade da fauna e da flora local, além de comprometer a segurança hídrica para o consumo humano.

Diante desses fatos, a busca por tecnologias alternativas de remediação sustentáveis tem ganhado força nas pesquisas acadêmicas, o tratamento de efluentes possui uma vasta serie de metodologias, entretanto, uma que vale a pena destacar é a adsorção. Esse tipo de processo abre precedentes para utilização de produtos sem valor agregado, onde eles serão utilizados como adsorvente.

Portanto, esse artigo abordará a eficiência do carvão de algaroba (*Prosopis juliflora*), os dados cinéticos obtidos foram avaliados por meio dos modelos matemáticos de Elovich, Boyd, Weber-Morris, Pseudo 1ª ordem e Pseudo 2ª ordem.

2 METODOLOGIA

Para os ensaios que foram realizados o material adsorvente utilizado foi o carvão de *Prosopis juliflora*, onde o mesmo foi preparado em forno mufla a 773,14ºK por um período de 3 horas.

Para o preparo da solução estoque dos corantes vermelho S-matrix e Azul S-matrix ambos da marca Bazektiv, onde sua composição química segue sob segredo industrial. A solução foi preparada na concentração de 40 PPM.

Já para o processo de adsorção foi realizado em batelada, foi pesado 0,3g do adsorvente e colocado em erlenmayers de 250 ml. Posteriormente foi adicionado 0,075 L da solução onde foram levados a uma mesa agitadora a uma rotação de 125 rpm. Os ensaios foram realizados em duplicata para garantir confiabilidade dos resultados. Em intervalos de tempo foram retiradas alíquotas eu posteriormente foram analisadas em espectrofotômetro UV/vis.

Para as analises de dados, os resultados foram plotados nos modelos matemáticos descritos a seguir.

Primeiramente para os cálculos de (I) capacidade de adsorção, (II) adsorção no tempo t e (III) porcentagem de remoção foi utilizadas as fórmulas a seguir:

$$qe = \frac{(Co - Ce)V}{m} \quad (1)$$

$$qt = \frac{(Co - Ct)V}{m} \quad (2)$$

$$\%R = \frac{Co - Ce)x100}{Co} \quad (3)$$

As fórmulas supracitadas são utilizadas no tratamento dos dados durante o processo de batelada e posteriormente esses dados foram aplicados aos modelos cinéticos a seguir, com o intuito de investigar o processo de adsorção dos corantes estudados.

Os modelos cinéticos de adsorção são ferramentas matemáticas fundamentais para compreender os mecanismos e as etapas que governam a remoção de contaminantes. A aplicação desses modelos aos dados experimentais permite identificar os fenômenos predominantes no processo de transferência de massa. A seguir são apresentados os modelos utilizados para determinação matemática do processo.

2.1 Modelo de pseudo-primeira ordem

O modelo de pseudo-primeira ordem (freqüentemente associado à equação de Lagergren) é expresso pela seguinte relação:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2{,}303} t \text{ou} q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$$

Onde q_e e qt e representam as capacidades de adsorção no equilíbrio e no tempo t ($mg \cdot g^{-1}$), respectivamente. Esse modelo é comumente empregado para descrever sistemas em que a taxa de ocupação dos sítios ativos é proporcional ao número de sítios desocupados, servindo como indicativo preliminar de processos dominados por adsorção física ou difusão externa.

2.2 Modelo de pseudo-segunda ordem

O modelo de pseudo-segunda ordem é representado pela equação:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q^2{}_e} + \frac{1}{q_e} t$$

Baseado na premissa de que a etapa limitante da velocidade pode envolver forças de valência por meio de compartilhamento ou troca de elétrons entre adsorvato e adsorvente, este modelo sugere forte indício de quimissorção. Nesse contexto Onde q_e e qt e são quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no equilíbrio e no tempo t ($g \cdot mg^{-1}\, min^{-1}$) e k_2 é a constante de velocidade do modelo pseudo 2ª ordem Simões (2023).

2.3 Modelo de Elovich

O modelo de Elovich é uma expressão matemática aplicada principalmente a superfícies heterogêneas e a processos cinéticos que envolvem reações de quimissorção, sendo descrito por:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t)$$

Neste modelo nos temos que q_t é a quantidade adsorvida no tempo t (mg . g^{-1}), o α é a taxa inicial de adsorção em mg . g^{-1} . min^{-1} e β é o parâmetro relacionado a extensão da cobertura da superfície e á energia de ativação para quimiossorção (mg . g^{-1}).

2.4 Modelo de Weber-Morris (difusão intraporo)

O modelo de Weber-Morris investiga se o transporte intraporo é o fator determinante (etapa limitante) na velocidade de remoção do soluto, sendo formulado como:

$$q_t = k_{id} t^{0,5} + C$$

Para o modelo de Weber-Morris temos que o K_{id} é o coeficiente da taxa de difusão intraporo (mg . g^{-1} . $min^{-0,5}$) e C é a constante que é diretamente ligada a camada limite onde valores de C diferentes de zero indicam que a difusão na camada limite exerce forte influencia sobre o processo e quanto maior o valor de C maior será essa influencia Weber-Morris (1963).

2.5 Modelo de difusão de Boyd

O modelo cinético de Boyd baseia-se em teorias de troca iônica para identificar os mecanismos de controle do transporte de massa durante a adsorção, sendo expresso por:

$$B_t = -0,4977 - \ln(1 - F)$$

Onde F é a representação da fração adsorvida em um dado tempo t, calculada por:

$$F = \frac{q_t}{q_e}$$

É a partir dos valores encontrados de B_t em função do tempo que se constrói um gráfico. Caso a reta gerada atravesse a origem, conclui-se que a difusão intraporo é a etapa determinante da velocidade do processo (Nascimento et al., 2020).

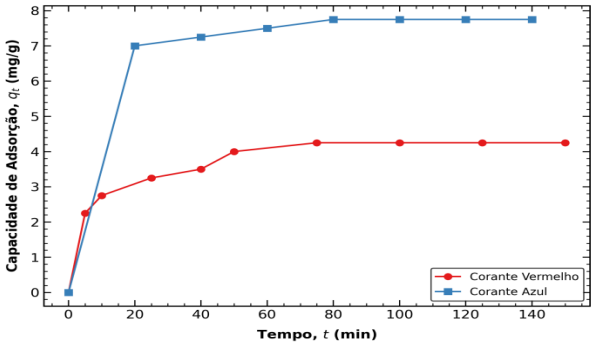
Assim, a aplicação do compilado dos dados obtidos durante o processo experimental nos modelos matemáticos permitem relacionar e pressupor hipóteses físico-quimicas de modo que se torne mais fácil a compreensão dos fenômenos envolvidos durante o processo de adsorção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão estão expressos os dados obtidos durante o processo de adsorção.

No gráfico um temos as curvas formadas durante o processo de adsorção, onde o adsorvente obteve um melhor desempenho de remoção com o corante azul.

Gráfico 1 – Cinética de adsorção

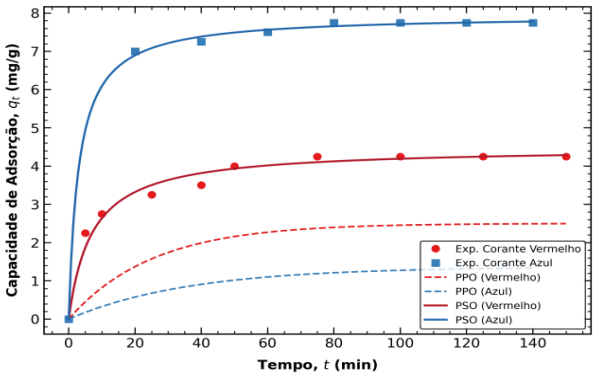


Fonte: Acervo pessoal (2026)

A partir dos dados cinéticos obtidos, eles foram aplicados nos modelos matemáticos descritos na metodologia a fim de entender o processo que estava acontecendo, de modo que esses modelos podem indicar o tipo de contribuição dos locais de adsorção, bem como se é uma adsorção de cunho físico ou químico.

O gráfico 2 é a aplicação dos dados nos modelos Pseudo primeira ordem (PPO) e Pseudo Segunda ordem (PSO). Alves (2026) acrescenta que: o modelo PPO se ajusta melhor a processos de adsorção em que a taxa de adsorção é diretamente proporcional ao numero de sítios ativos disponíveis; já o modelo PSO indica uma adsorção heterogênea e que o processo envolve quimiossorção, ou seja, envolve a troca de elétrons. A seguir temos a aplicação dos dados nos dois modelos.

Gráfico 2 – Modelos PSO e PPO



Fonte: Acervo pessoal (2026)

O melhor ajuste dos dados tanto da adsorção do corante vermelho quanto do corante azul o modelo PSO, esses dados sugerem que o adsorvente apresenta uma superfície heterogênea. Os dados dos parâmetros obtidos dos dois modelos estão descritos na tabela a seguir.

Tabela 1 – Parâmetros Pseudo-primeira e Pseudo-segunda ordem

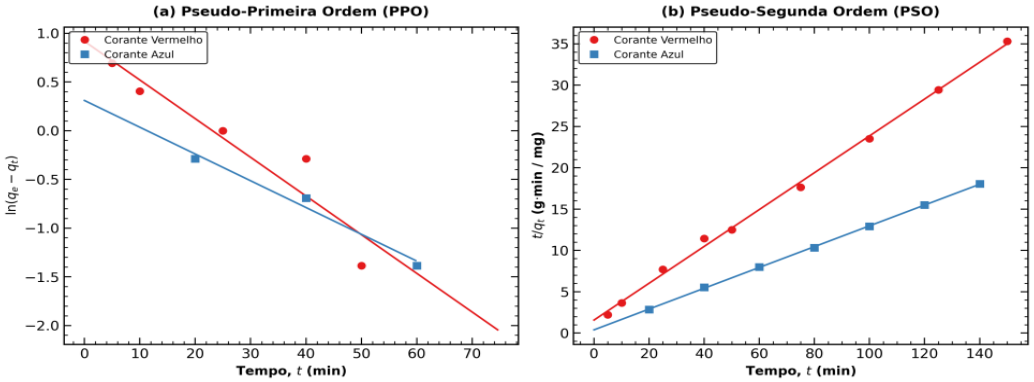
Modelo Cinético	Parâmetros principais	Corante Vermelho	Corante Azul
Pseudo-Primeira Ordem (PPO)	K_1 (min^{-1})	0,0397	0,0275
	R^2	0,8964	0,7777
Pseudo-Segunda Ordem (PSO)	K_2 ($g.mg^{-1}.min^{-1}$)	0,0317	0,0412
	$q_{e,\,calc}$ (mg/g)	4,49	7,95
	q_e exp (mg/g)	4,25	7,75
	R^2	0,9980	0,9998

Fonte: Acervo pessoal (2026)

A partir da analise dos dados obtidos, observa-se que os sistemas entram em equilibrio rápido, de modo que em media 20min eles já atingiram sua capacidade adsortiva total e posteriormente ocorre uma variação curta em relação ao inicio. Ambos ensaios se ajustaram melhor ao modelo Pseudo-segunda ordem com seus respectivos R^2 do vermelho em "0,9980" e para o azul de "0,9998". Glavina (2025) corrobora dizendo que coeficientes de correlação quanto mais próximos de 1, melhor é o relação do modelo experimental com o modelo matemático, bem como, ao se ajustarem melhor ao modelo PSO isso é um indicativo que o processo pode ser governado por forças químicas como troca ou compartilhamento de elétrons. O fato dos $q_e$calc e o $q_e$exp terem valores semelhantes so corrobora ainda mais a predição da quimiossorção.

A seguir nos temos os gráficos a respeito do modelo linearizado dos modelos PSO E PPO.

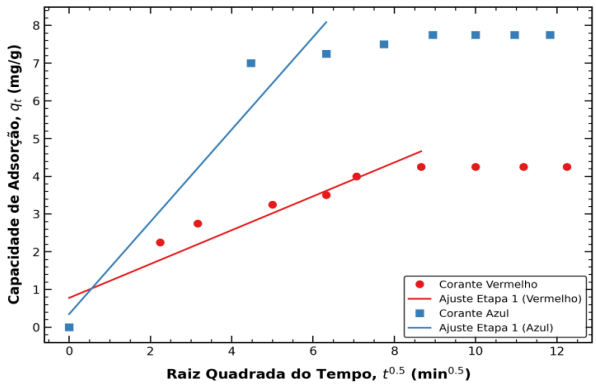
Gráfico 3 – Linearização dos modelos Pseudo-primeira e Pseudo-segunda ordem



Fonte: Acervo pessoal (2026)

Com a linearização torna-se mais evidente o a tendência para o modelo PSO. Todavia aplicação nos outros modelos é fundamental para corroborar ainda mais os dados encontrados. A seguir temos os gráficos das aplicações no modelo de Weber-Morris.

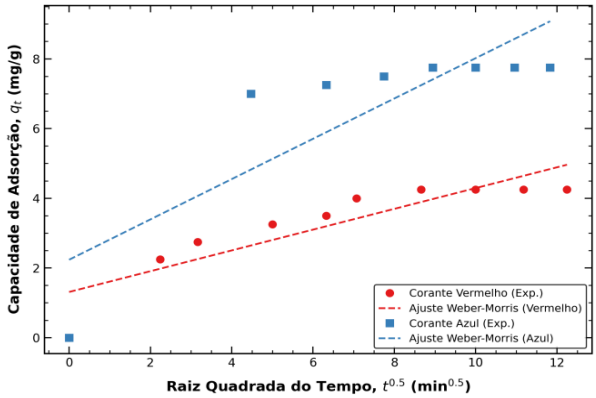
Gráfico 4 – Ajuste primeira etapa Weber-Morris



Fonte: Acervo pessoal (2026)

O modelo visa analise da progressão da adsorção em função da raiz quadrada do tempo (q_t vs $t^{0,5}$) de modo que o modelo preditivo baseia-se no transporte de massa de moléculas de corante ate os sítios ativos disponíveis.

Gráfico 5 – Modelo Weber-Morris



Fonte: Acervo pessoal

A seguir temos uma tabela onde estão localizados os valores encontrados no modelo.

Tabela 2 – Dados obtidos no Modelo de Weber-Morris

		Vermelho	Azul
Difusão intraparticula (Weber-Morris)	K_{id} (mg.mg^{-1}.min$^{-0,5}$)	0,2981	0,5783
	C (mg/g)	1,3111	2,2365
	R^2	0,7893	0,7049

Fonte: Acervo pessoal (2026)

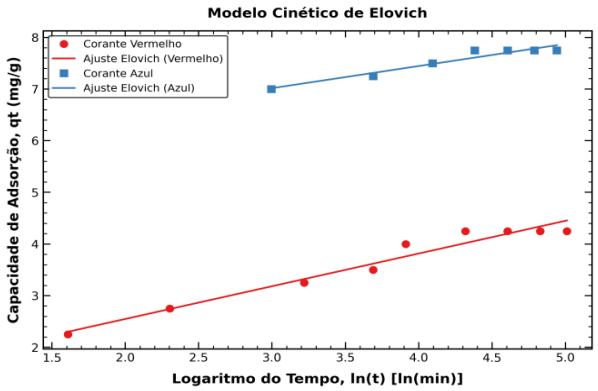
Shu et al., (2025) acrescenta que s valores de K_{id} representam a taxa da velocidade da difusão intraparticula, quanto maior o valor de K_{id} maior será a rapidez da difusão do contaminante pelos poros do adsorvente e os valores de "C", caso C=0 tendo a reta passando na

origem a difusão intraparticula é a única força que controla o processo. Carvalho, Fungaro Izidoro (2010) corroboram dizendo que: no modelo de Weber-Morris, a falta de linearidade também indica que diferentes aspectos controlam o processo.

Em nossos dados obtivemos valores de C diferentes de zero, levando os indicativos que existem outras forças que controlam o processo envolvendo a adsorção dos corantes, o C = 1,31mg/g para o vermelho e o C = 2,24 mg/g para o azul indicam uma resistência da camada limite e a difusão nos poros estão atuando juntos. Sousa et al., (2007) em seu trabalho obteve patamares menores dos valores de K_{id} onde ela concluiu que o modelo não se ajustava bem aos seus dados e que a influencia da difusão intrapaticula era de baixa contribuição.

A seguir temos o compilado dos gráficos que representam os modelos de Elovich e boyd.

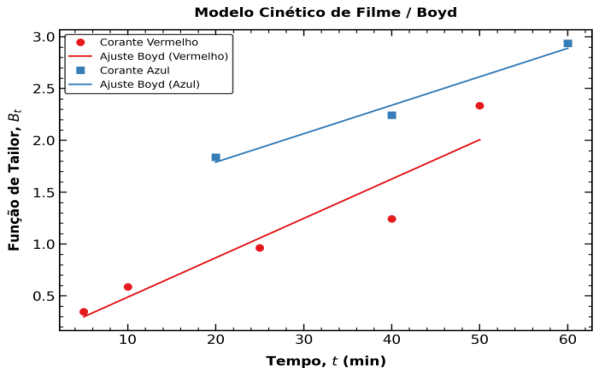
Gráfico 6 – Modelo Elovich



Fonte: Acervo pessoal (2026)

O modelo de Elovich é um modelo comumente aplicado em processos que os dados apontem um processo de quimiossorção. Villamizar (2010) acrescenta que: o modelo geral de Elovich supõe que os sítios ativos do adsorvente são heterogêneos e por isso possuem diferentes energias de ativação e diferentes mecanismos de reações.

Gráfico 7 – Modelo de Boyd



Fonte: Acervo pessoal

Já para o modelo cinético de Boyd ele busca identifcar ou corroborar os resultados obtidos anteriormente sobre as influências e controle no processo.

Onde: a difusão na camada limite é que as moléculas do contaminant precisam atravessar uma camada de fluido que envolve as partículas do adsorvente ate sua alcançar sua superfície. Diferente do mecanismo de Weber-Morris em que as moléculas precisam se deslocar pelos poros ate atingir os sítios ativos. A seguir temos os valores encontrados nos modelos de Elovich Boyd na tabela 3.

Tabela 3 – Dados Elovich e Boyd

Modelos		Vermelho	Azul
Elovich	α ($mg.g^{-1}.min^{-1}$)	1,8421	125,4132
	β ($g.mg^{-1}$)	1,7734	11,8483
	R^2	0,9375	0,9356
Boyd	R^2 do ajuste	0,8846	0,9777

Fonte: Acervo pessoal

Os valores obtidos de α segundo Tavlieva (2013) α < 1 diz respeito a pouca afinidade do adsorvente com adsorvato, já para valores de α > 1 são para afinidades significativas. Nesse contexto, o carvão utilizado possui afinidades consideráveis pelos corantes, com destaque maior a afinidade pelo corante azul.

Para Moura (2025) o parâmetro β quanto maior for seu valor, maior será o preenchimento dos sítios ativos. Assim o carvão demonstra uma afinidade e uma adsorção mais rápida para o corante azul. E para o ajuste do R^2 de ambos acima de "0,9" corrobora com os dados encontrados ate aqui onde eles indicam um processo governado por químiossorção. Rocha et al., (2012) ainda acrescentam que gráficos onde a linearidade passam pela origem são indicativos que a difusão intraparticula governa o processo, já quando a linearidade não passam na origem é indicio de transporte externo no processo de adsorção. Além disso, Rocha et al., (2012) também explica o fenômeno que acontece com os resultados encontrados tendo em vista que, os resultados não seguem a linearidade sendo evidenciados no R^2 do corante vermelho tal que isso indica um controle misto do processo, difusão intraparticula e difusão externa.

Já para o corante azul o ajuste do coeficiente de correlação é mais coerente om um controle de difusão externo, respaldado pelo R^2 de 0,9777. De toda forma, ambos os indicativos expressão que os processos de adsorção dos corantes ocorrem em regime de quimiossorção.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos cinéticos realizados com os corantes Vermelho e Azul, utilizando o carvão obtido da biomassa de *Prosopis juliflora*, foi possível observar que o material apresenta um bom potencial para a remoção de corantes em meio aquoso. Entre os dois sistemas avaliados, o corante Azul apresentou maior afinidade com o adsorvente e a maior capacidade de adsorção, quando comparado ao corante Vermelho.

Em relação aos modelos cinéticos, o modelo de Pseudo-Segunda Ordem apresentou os melhores ajustes para ambos os corantes, com elevados coeficientes de determinação e valores de capacidade de adsorção no equilíbrio muito próximos daqueles obtidos experimentalmente. Esses resultados indicam que as interações entre os corantes e os sítios ativos presentes na superfície do carvão desempenham um papel importante no processo de adsorção. Além disso, o bom ajuste ao modelo de Elovich reforça a possibilidade de ocorrência de interações químicas em uma superfície energeticamente heterogênea.

A análise dos modelos de Weber-Morris e Boyd também permitiram compreender melhor os mecanismos envolvidos no processo. Os resultados apontaram para a participação de diferentes etapas no transporte de massa, uma vez que as curvas apresentaram mais de uma região linear e interceptos positivos, sem passar pela origem. Esse comportamento indica que a difusão intrapartícula não atua isoladamente como etapa limitante da adsorção. Pelo contrário, tanto a resistência à transferência de massa na camada limite superficial quanto os processos de difusão nos poros e as interações na interface adsorvente-solução contribuem para o comportamento cinético observado.

De modo geral, os resultados demonstram que o carvão de *Prosopis juliflora* apresenta potencial como material adsorvente para a remoção dos corantes estudados, sendo o desempenho influenciado pelas características de cada molécula e pelos diferentes mecanismos de transporte e interação envolvidos no processo.

REFERÊNCIAS

ALVES, Júlia Espíndola. Descontaminação de corantes têxteis em meio aquoso utilizando biochar proveniente de resíduo agrícola. [S.l.]: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 12 fev. 2026.

CARVALHO, Terezinha Elizabeth Mendes de; FUNGARO, Denise Alves; IZIDORO, Juliana de Carvalho. Adsorção do corante reativo laranja 16 de soluções aquosas por zeólita sintética. **Química Nova**, v. 33, n. 2, p. 358-363, 2010.

CHU, Khim Hoong et al. The Weber–Morris model in water contaminant adsorption: Shattering long-standing misconceptions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 4, p. 117266, 2025.

GLAVINA, Eva Silva. Adsorção do corante têxtil azul reativo dc-2g em efluente sintético: desempenho do carvão vegetal não tratado como adsorvente. 2025.

GUARATINI, Cláudia CI; ZANONI, Maria Valnice B. Corantes têxteis. Química nova, v. 23, n. 1, p. 71-78, 2000. Disponivel em: https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000100013. Acesso em: 31/07/2026

MOURA, Luiz Eduardo Freitas de. Adsorção de corantes reativos" vermelho e azul s-matrix 150" utilizando cinzas do carvão da pirólise do Rennisetwm RurRnremm. 2025.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2020. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271. Acesso em: 03/08/2026.

ROCHA, Otidene Rossiter Sá da et al. Avaliação do processo adsortivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R. **Química nova**, v. 35, p. 1369-1374, 2012.

SIMÕES, Veruska do Nascimento. Tratamento do pó de capim elefante por explosão a vapor e impregnação de tensoativo para adsorção de cromo em meio aquoso: processos batelada e dinâmico. Orientador: João Fernandes de Sousa. 2023. 136f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

SOUSA, Francisco W. et al. Uso da casca de coco verde como adsorbente na remoção de metais tóxicos. **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1153-1157, 2007.

TAVLIEVA, Mariana P. et al. Kinetic study of brilliant green adsorption from aqueous solution onto white rice husk ash. Journal of Colloid and Interface Science, v. 409, p. 112- 122, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.07.052. Acesso em: 02/11/2026

VILLAMIZAR, LUZ DARY DIAZ. MODELAMIENTO DE LA CINÉTICA DE BIOADSORCIÓN DE Cr (III) USANDO CÁSCARA DE NARANJA. **Dyna**, 2010.

WEBER JR, Walter J.; MORRIS, J. Carrell. Kinetics of adsorption on carbon from solution. Journal of the sanitary engineering division, v. 89, n. 2, p. 31-59, 1963. Disponível em: https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000430. Acesso em: 07/09/2026