

Remoção do corante rodamina B de águas residuais sintéticas por processos adsorptivos: uma revisão bibliográfica

Removal of rhodamine B dye from synthetic wastewater by adsorption processes: a literature review

Remoción del colorante rodamina B de aguas residuales sintéticas mediante procesos adsorptivos: una revisión bibliográfica

Camila da Silva Rodrigues¹

Letícia Duarte da Silva²

Rosane Freire Boina³

Resumo: O presente estudo tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico para investigar a remoção do corante rodamina B por técnicas de adsorção, bem como a eficiência dos resíduos de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) e casca de laranja como materiais adsorventes. Dessa forma, busca-se responder o seguinte questionamento: quais os mecanismos e as propriedades físico-químicas que determinam a eficiência de remoção do corante RB em diferentes matrizes adsorventes? Trata-se de uma pesquisa exploratória com abordagem qualitativa. Os resultados revelam que a capacidade de adsorção e eficiência de remoção do poluente são dependentes do efeito do pH, da concentração inicial do adsorvato, da dosagem de adsorvente e das propriedades dos precursores adsorventes. O lodo apresenta uma composição inorgânica que confere estabilidade física e química ao material, enquanto a casca de laranja possui uma estrutura porosa, que leva ao aumento da capacidade de adsorção e da área superficial.

Palavras-chave: Rodamina B. Adsorção. Tratamento de água. lodo de ETA. Casca de laranja.

Abstract: The present study aims to conduct a bibliographic survey to investigate the removal of the dye rhodamine B through adsorption techniques, as well as the efficiency of water treatment plant (WTP) sludge and orange peel residues as pollutant adsorbent materials. Thus, the study seeks to answer the following question: what are the mechanisms and physicochemical properties that determine the removal efficiency of RB dye in different adsorbent matrices? This is an exploratory research with a qualitative approach. The results reveal that the adsorption capacity and pollutant removal efficiency depend on the effect of pH, initial adsorbate concentration, adsorbent dosage, and the properties of the adsorbent precursors. The sludge has an inorganic composition that provides physical and chemical stability to the material, while the orange peel has a porous structure, leading to increased adsorption capacity and surface area.

Keywords: Rhodamine B. Adsorption. Water treatment. WTP sludge. Orange peel.

¹ Graduada em Engenharia Ambiental. Universidade Estadual Paulista - UNESP. <https://orcid.org/0000-0002-1904-7429>. E-mail: camila.s.rodrigues@unesp.br

² Graduanda em Engenharia Ambiental. Universidade Estadual Paulista - UNESP. <https://orcid.org/0009-0004-7203-0476>. E-mail: leticia.duarte-silva@unesp.br

³ Doutora. Universidade Estadual Paulista - UNESP. <https://orcid.org/0000-0002-9903-5902>. E-mail: rosane.freire@unesp.br

Resumen: El presente estudio tiene como objetivo realizar un levantamiento bibliográfico para investigar la remoción del colorante rodamina B mediante técnicas de adsorción, así como la eficiencia de los residuos de lodo de plantas de tratamiento de agua (PTA) y cáscara de naranja como materiales adsorbentes de contaminantes. De esta forma, se busca responder el siguiente cuestionamiento: ¿cuáles son los mecanismos y las propiedades fisicoquímicas que determinan la eficiencia de remoción del colorante RB en diferentes matrices adsorbentes? Se trata de una investigación exploratoria con un enfoque cualitativo. Los resultados revelan que la capacidad de adsorción y la eficiencia de remoción del contaminante dependen del efecto del pH, la concentración inicial del adsorbato, la dosis de adsorbente y las propiedades de los precursores adsorbentes. El lodo presenta una composición inorgánica que confiere estabilidad física y química al material, mientras que la cáscara de naranja tiene una estructura porosa, lo que aumenta la capacidad de adsorción y el área superficial.

Palabras-clave: Rodamina B. Adsorción. Tratamiento de agua. Lodo de PTA. Cáscara de naranja.

Submetido 14/04/2025

Aceito 23/06/2025

Publicado 01/07/2025

Considerações Iniciais

A indústria têxtil exerce um papel essencial na economia global, ao responsabilizar-se pela produção em larga escala de tecidos e vestuário. Contudo, seu impacto ambiental é expressivo, especialmente no que se refere à poluição hídrica causada por corantes industriais (Chen et al., 2022). Esses compostos são amplamente utilizados para conferir coloração aos produtos têxteis, mas sua estrutura química complexa e alta resistência à degradação os tornam poluentes persistentes no meio ambiente (Venkatesan et al., 2025).

A estabilidade química dos corantes, aliada à sua baixa biodegradabilidade, permite que permaneçam por longos períodos nos corpos hídricos, que podem ser absorvidos e bioacumulados ao longo da cadeia alimentar, comprometendo a fauna e a flora aquática (Venkatesan et al., 2025). Além disso, muitos desses compostos possuem propriedades tóxicas e potencialmente cancerígenas, o que agrava os riscos ambientais e de saúde pública (Chen et al., 2022).

Dentre esses compostos, a Rodamina B (RB) destaca-se pelo amplo uso nas indústrias têxtil, farmacêutica, plástica e de impressão, em razão de ser um corante solúvel em água e que apresenta alta cromaticidade, isto é, possui uma coloração intensa e vibrante, altamente visível mesmo em pequenas concentrações. Além disso, sua estabilidade química dificulta a degradação natural e eleva seu potencial poluente (Chen et al., 2022).

Apesar da diversidade de métodos disponíveis para a remoção de poluentes persistentes, ainda não existe uma solução única e definitiva para o tratamento de efluentes têxteis. Frequentemente, a aplicação isolada de uma única técnica não é suficiente, exige a integração de diferentes abordagens para garantir uma remoção eficiente dos contaminantes, o que eleva os custos operacionais (Neto, 2024).

Nesse contexto, diferentes técnicas têm sido exploradas para o tratamento de efluentes contaminados por corantes, como biodegradação, separação por membranas, processos oxidativos, eletrocoagulação e adsorção. Dentre essas alternativas, a adsorção se sobressai como uma das soluções viáveis, tendo em vista que alia baixo custo operacional, elevada eficiência na remoção de poluentes e facilidade de aplicação (Chen et al., 2022).

A adsorção é um processo superficial físico-químico em que o poluente (adsorvato) se fixa na superfície do adsorvente, na qual é retido por diferentes tipos de interações, como forças

eletrostáticas, ligações de hidrogênio, complexação, interações dipolo-dipolo, troca iônica e quimissorção (Freire-Boina et al., 2024).

Para que um material sólido seja empregado como adsorvente, é essencial que: (i) apresente uma área superficial ampla; (ii) contenha grupos funcionais que favoreçam a interação com o adsorvato; (iii) possua boa seletividade em relação ao soluto; e (iv) tenha um custo reduzido (Neto, 2024). Entre os adsorventes de menor custo, destacam-se os resíduos agroindustriais, que se caracterizam por seu baixo valor comercial, ampla disponibilidade e fácil obtenção (Bushra et al., 2021).

A laranja é uma das principais culturas agrícolas do Brasil e apresenta uma ampla produção de suco, que ultrapassa 8 mil toneladas anualmente (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019). No entanto, um grande volume dessa produção resulta em resíduos correspondentes a cerca de 50% do peso total da fruta (Bushra et al., 2021).

Esses resíduos, formados principalmente por cascas e bagaço, possuem composição rica em fibras naturais, que incluem aproximadamente 9% de celulose, 10% de hemicelulose e 42% de pectina. Essas fibras apresentam características que favorecem processos de adsorção, e fazem dos resíduos da laranja uma alternativa promissora na remoção de contaminantes em soluções aquosas (Bushra et al., 2021).

Com isso, a combinação de lodo de Estação de tratamento de água (ETA) e a casca de laranja para remoção do corante RB representa uma abordagem inovadora e sustentável para o tratamento de efluentes industriais do setor têxtil. Para isso, os mecanismos e as propriedades físico-químicas que determinam a eficiência de remoção do corante RB em matrizes adsorventes devem ser elucidados. Portanto, a partir da pergunta “quais os mecanismos e as propriedades físico-químicas que determinam a eficiência de remoção do corante RB em diferentes matrizes adsorventes?”, o objetivo deste estudo foi realizar um levantamento bibliográfico a respeito do corante RB e dos precursores de adsorventes de interesse – lodo de ETA e casca de laranja – para aplicação futura em ensaios de adsorção, que visa a remoção do corante de soluções aquosas sintéticas.

Diante do objetivo e da discussão proposta mencionada anteriormente, este artigo está organizado em cinco seções principais. Na primeira, apresentam-se os dados obtidos a partir da revisão bibliográfica sobre o uso de diferentes matrizes adsorventes na remoção da Rodamina B. Na segunda, discutem-se os tratamentos aplicados aos precursores de adsorventes, com

destaque para as condições térmicas e químicas utilizadas. A terceira seção trata do comportamento das cascas de laranja como material de interesse, seguida da quarta, dedicada à análise do lodo de ETA como precursor adsorativo. Por fim, finaliza-se com uma discussão embasada nos estudos analisados e algumas considerações finais.

Metodologia

Esta revisão bibliográfica foi desenvolvida a partir de artigos e dissertações disponíveis *online* nas seguintes bases de dados: ScienceDirect, SciELO e Repositórios Universitários (USP, Unesp e Unicamp). Foram selecionados materiais publicados entre 2015 e 2025 que estivessem disponíveis na íntegra e que apresentassem relação com o tema proposto, além de informações pertinentes à pesquisa.

A busca utilizou combinações de palavras-chave. As palavras-chave buscadas foram: “adsorção”, “lodo de ETA”, “casca de laranja” e “rodamina B” (“adsorption”, “WTS”, “orange peel” e “rhodamine B”).

Análise dos Dados e Resultados

A análise das informações foi realizada por meio de leitura exploratória, em uma abordagem qualitativo-quantitativa. Inicialmente, foram selecionados 30 documentos bibliográficos, dos quais 13 atenderam aos critérios necessários para esta revisão. Os elementos abordados na sistematização dos resultados centraram-se nos seguintes: métodos de tratamento do adsorvente; eficiência do método de adsorção; efeito do pH; efeito da concentração inicial do adsorvato; dosagem do adsorvente; cinética; e isotermas de adsorção. Por fim, os dados foram organizados em quadros que apresentam os resultados mais eficientes de cada estudo.

Corante rodamina B: tratamento por adsorção

O Quadro 1 apresenta a síntese dos principais resultados obtidos por meio do levantamento de dados referentes ao tratamento do corante RB por adsorção. A partir da busca bibliográfica, observou-se uma grande variedade de precursores naturais aplicados para o tratamento do corante RB, como talos de algodão (Venkatesan et al., 2025), cascas de romã (Ghibate et al., 2025), cascas de banana (Neolaka et al., 2024), cascas de laranja (Neto, 2024), entre outros (Quadro 1).

Os tratamentos empregando matrizes adsorventes na retenção do corante RB variaram conforme os métodos adotados por cada autor. Neolaka et al. (2024) aplicaram uma ativação verde a partir do suco de limão em resíduos de casca de banana, e alcançaram uma eficiência de remoção (EF) >80% de RB. Venkatesan et al. (2025) atingiram 99,5% de eficiência de remoção e capacidade máxima de adsorção ($q_{\max}$) igual a 144,36 mg/g utilizando carvão ativado a partir de talos de algodão, com adição de H_3PO_4 para ativação química. Pompeu et al. (2023) e Ghibate et al. (2025) também trabalharam com ativação química, com adição de Al_2O_3 às cascas de camarão e NaOH às cascas de romã, respectivamente, obtendo capacidades máximas de adsorção de 350,55 e 44,28 mg/g.

Quadro 1 - Estudos sobre adsorção em diferentes matrizes adsorventes para remoção do corante rodamina B nas condições ótimas de operação.

Adsorvente	Massa (g)	C_0 (mg/L)	pH	T (°C)	EF (%)	te (min)	MC	$q_{\max}$ (mg/g)	MI	Referência
Turfa (tratada termicamente)	0,050	10 - 1000	2 - 10	25	93	240	PSO	162,87	Sips	Chieng, Lim, Priyanta (2015)
Folhas de cânfora (tratadas termicamente)	0,6	10 - 200	2 - 12	30 - 50	NR	100	PSO	NR	K-C	Gan et al. (2016)
Erva-de-jacaré (biocarvão)	0,4	100 - 250	2 - 12	25 - 35	NR	240	PSO	250	L	Du et al. (2018)
Talos de algodão (carvão ativado)	0,2 - 1,0	20 - 100	2 - 10	NR	99,5	45	PSO	144,36	L	Venkatesan et al. (2025)
Casca de romã (ativada quimicamente)	0,1	100	7	25 - 55	NR	120	PSO	44,28	L	Ghibate. et al. (2025)
Semente de <i>Calophyllum inophyllum</i> (biocarvão)	0,1 - 1,4	50 - 300	2	30 - 40	95,5	25	PSO	169,5	L	Behera, Shadanji e Sarangi, (2024)
Casca de banana (ativada com suco de limão)	NR	10 - 100	6	30 - 60	83,25	80	PSO	NR	F	Neolaka et al. (2024)
Casca de camarão (biocarvão)	4,5	NR	9	25	72,34	NR	PSO	350,55	F	Pompeu et al. (2023)
Casca de laranja (biocarvão)	0,01 - 1	10	5 - 7	25	72	5.760	PSO	0,29	NR	Neto (2024).

Fonte: Autoria própria (2025).

Legenda: C_0 : concentração inicial do corante (mg/L); T: temperatura; te: tempo de equilíbrio; MC: modelo cinético; PPO: pseudo-primeira ordem; PSO: pseudo-segunda ordem; E: modelo cinético de Elovich; q_{max} : capacidade máxima de adsorção; MI: modelo isotérmico; L: isoterma de Langmuir; F: isoterma de Freundlich; T: isoterma de Temkin; K-C: isoterma de Koble-Corrigan; NR: Não relatado.

Por outro lado, o trabalho desenvolvido por Neto (2024) apresentou eficiência de remoção >70% a partir de ensaios de adsorção em batelada. Nos ensaios em coluna, o trabalho alcançou uma capacidade máxima de adsorção de 0,29 mg/g. Além disso, o tempo que o sistema levou para alcançar o equilíbrio (5.760 min) foi maior em comparação aos estudos de Ghibate et al. (2025) (120 min) e Behera, Shadanji e Sarangi (2024) (25 min), que também utilizaram resíduos orgânicos como adsorvente.

Em particular, no estudo de Neto (2024) com o uso de cascas de laranja para remoção de RB em soluções aquosas, os resíduos foram submetidos por processos de secagem em estufa a 105°C por 48h e, em seguida, ao processo de pirólise à 650°C, obtendo o biocarvão. Vale destacar que a prática de ativação térmica e/ou química é muito empregada nos estudos de síntese de novos adsorventes. Segundo Silva et al. (2023), a forma de aplicação do adsorvente afeta diretamente as curvas de adsorção, principalmente quando se utilizam resíduos orgânicos como precursores do adsorvente. Chien, Lim e Priyanta (2015) trataram a turfa a uma temperatura de 60 °C, enquanto Neolaka et al. (2024) trataram as cascas de banana a 70°C e Behera, Shadanji e Sarangi (2024) submeteram as cascas de romã a 600 °C, valor mais próximo do tratamento aplicado às cascas de laranja, porém com adição de HCl, NaOH, NaCl e C₂H₅OH.

Ainda, Du et al. (2018) e Gan et al. (2016) utilizaram o uso de plantas como a erva-de-jacaré (*Alternanthera philoxeroides*) e folhas de cânfora (*Cinnamomum camphora*) para remoção de RB, ambas tratadas termicamente a 600 e 110 °C, respectivamente. Os adsorventes foram aplicados em pó e não foram inseridos compostos químicos para o tratamento. Chien, Lim e Priyanta (2015) utilizaram a turfa como precursor – um composto de folhas, musgos e restos vegetais de árvores – também sem adição de compostos químicos. Du et al. (2018) apresentaram uma capacidade máxima de adsorção de 250 mg/g em concentração inicial de 150 mg/L de RB em solução, enquanto Chien, Lim e Priyanta (2015) chegaram a uma capacidade máxima 162,87 mg/g em concentração inicial de 10 g/L. Esses resultados sugerem que existe uma boa afinidade química entre adsorvente e adsorvato.

De acordo com García et al. (2023) e Cruz et al. (2023), compostos orgânicos volatizam-se em temperaturas elevadas. A degradação da hemicelulose, celulose e lignina ocorre entre 400 °C e 700 °C (Agostinho et al., 2021), e estes são compostos importantes para as propriedades adsorptivas em resíduos orgânicos (Martins, 2021). Dessa forma, é importante estudar com cautela, as propriedades do corante RB e dos precursores adsorventes, a fim de preservar as condições ideais de adsorção e evitar perdas na eficiência e na capacidade de adsorção.

Lodo de ETA aplicado à adsorção de corantes

O lodo de ETA possui uma composição química mineralógica, com presença de metais como o ferro, silício e alumínio, que conferem maior área superficial e reatividade em adsorventes (Ritter e Hassemer, 2021). Além disso, o resíduo tem apresentado resultados satisfatórios em estudos recentes de adsorção de corantes (Martins et al., 2021; Freire-Boina et al., 2024).

O potencial de utilização benéfica do lodo de ETA abrange diversas aplicações inovadoras e tem sido cada vez mais estudado por pesquisadores em busca de alternativas ambientalmente favoráveis para o resíduo. Entre as possibilidades de uso do lodo, tem-se a sua incorporação em materiais cerâmicos (Yu et al., 2023; Oliveira, Tenório e Marques, 2023), cimentícios (Ruviano et al., 2020; Meert, Hastenpflug e Andrade, 2021; Silva, Barboza e Silva, 2020), em solo e espécies nativas (Moselli et al., 2022; Martins et al., 2023; Arantes et al., 2022) e adsorventes (Almeida et al., 2024; Souza e Carvalho, 2020; Freire-Boina et al., 2024).

O Quadro 2 mostra os principais resultados encontrados de estudos que utilizaram o lodo de ETA como adsorvente para remoção de corantes diversos em solução aquosa. Até o presente momento, o lodo de ETA ainda não foi estudado para o tratamento do corante RB. Dentro do período de 2015 a 2025, apenas quatro trabalhos envolvendo o resíduo para a remoção de corantes foram encontrados nas bases de dados.

Para o lodo de ETA, as principais diferenças observadas na aplicação como adsorvente foram a adição de H_3PO_4 no estudo de Souza e Carvalho (2020), que aplicaram o produto em forma de pó, assim como Djekoune et al. (2022). No primeiro estudo, o lodo sofreu pirólise a uma temperatura de 500 °C, enquanto o segundo submeteu o lodo a uma temperatura de 105 °C, com adição de NaOH e HCl. Freire-Boina et al. (2024) desenvolveram uma matriz cerâmica

a partir do lodo de ETA e argila, moldada em forma de pastilhas e tratada termicamente em diferentes temperaturas, sem adição de compostos químicos. Silva (2018) combinou o lodo de ETA com resíduos de poda urbana e transformou o material em pellets de diferentes densidades, com tratamento térmico de 250 °C. Porém, o autor menciona que a temperatura utilizada conferiu baixa porosidade de superfície ao adsorvente produzido.

Quadro 2 - Estudos sobre adsorção em lodo de ETA para remoção de corantes diversos nas condições ótimas de operação.

Adsorvente	Massa (g)	Corante	C ₀ (mg/L)	pH	T (°C)	EF (%)	te (min)	MC	q _{máx} (mg/g)	MI	Referência
Lodo de ETA (biocarvão)	10	Azul de metileno	40	1-12	20	73,5	NR	PSO	29,4	L	Silva (2018)
Lodo de ETA (ativado termicamente)	2	Melioderma preto AFP 135	100	1 - 4	20	97	60	PSO	123,46	F; L	Djekoune et al. (2022)
Lodo de ETA (ativado termicamente)	0,45 - 1,80	Azul reativo BF5G	1 - 30	3	25 - 45	60 - 90	2880	E	0,765	L	Freire Boina et al. (2024)
Lodo de ETA (ativado térmico e quimicamente)	0,3	Negro de eriocromo T	0,05	7	25	90,1	20	PSO	NR	NR	Souza e Carvalho (2020)

Fonte: Autoria própria (2025).

Legenda. C₀: concentração inicial do corante (mg/L); T: temperatura; te: tempo de equilíbrio; MC: modelo cinético; PPO: pseudo-primeira ordem; PSO: pseudo-segunda ordem; E: modelo cinético de Elovich; q_{máx}: capacidade máxima de adsorção; MI: modelo isotérmico; L: isoterma de Langmuir; F: isoterma de Freundlich; T: isoterma de Temkin; KC: isoterma de Koble-Corrigan; NR: Não relatado.

Analisando os resultados organizados no Quadro 2, todos os estudos alcançaram eficiências de remoção superior a 60% e capacidade máxima de adsorção, com base na concentração inicial do corante, na dosagem do adsorvente e nos modelos de isotermas aplicados para o ajuste dos dados experimentais. No entanto, Freire-Boina et al. (2024) apresentaram uma alternativa inovadora ao transformarem o adsorvente em sólido sem adições químicas, tornando o processo mais viável em termos econômicos e ambientais.

Casca de laranja aplicada à adsorção de corantes

A casca de laranja está entre os resíduos agrícolas mais estudados para aplicação como adsorvente, em razão de sua composição química rica em pectina, hemicelulose, celulose e lignina (Feltrin e Cechinel, 2024; Souza et al., 2019). Tais componentes apresentam diversos grupos funcionais polares, como os carboxílicos e fenólicos, que proporcionam uma estrutura porosa ao adsorvente (Feltrin e Cechinel, 2018; Souza et al., 2019; Sousa et al., 2021). A partir do Quadro 3, foi possível analisar os principais resultados obtidos em estudos que aplicaram as cascas de laranja como precursor principal para adsorção de corantes diversos.

Quadro 3 - Estudos sobre adsorção em casca de laranja para remoção de corantes diversos nas condições ótimas de operação.

Adsorvente	Massa (g)	Corante	C ₀ (mg/L)	pH	T (°C)	EF (%)	te (min)	MC	q _{máx} (mg/g)	MI	Referência
Casca de laranja (tratada termicamente)	0,3	Azul de toluidina	20 - 160	2 - 10	25 - 55	NR	10	PSO	314,3	L	Lafi, Rezma e Hafiane (2015)
Casca de laranja (modificada quimicamente)	0,05	Vermelho congo	50 - 300	3 - 9	25	NR	60	PSO	163	L	Munagapati e Kim (2016)
Casca de laranja (tratada termicamente)	0,1	Azul de metileno	50 - 500	2 - 7	25	NR	35	PSO	256,41	L	Guiza, Franck e Bagané (2018)
Casca de laranja (biocarvão)	0,1 - 0,5	Azul de metileno	0 - 1.100	7 - 8	25	99	1.440	PSO	382,15	L	Bediako et al. (2020)
Casca de laranja (tratada termicamente)	0,3	Vermelho 40	57	NR	25	NR	60	NR	8,36	L	Jandrey (2021)
Casca de laranja (tratada quimicamente)	2,2	Azul de metileno	15	NR	25	96	10 - 60	PSO	27,78	L	Rosanti et al. (2022)
Casca de laranja (biocarvão)	0,01 - 1	Rodamina B	10	5 - 7	25	72	5.760	PSO	0,29	NR	Neto (2024)

Fonte: Autoria própria (2025).

Legenda. C₀: concentração inicial do corante (mg/L); T: temperatura; te: tempo de equilíbrio; MC: modelo cinético; PPO: pseudo-primeira ordem; PSO: pseudo-segunda ordem; E: modelo cinético de Elovich; q_{max}: capacidade máxima de adsorção; MI: modelo isotérmico; L: isoterma de Langmuir; F: isoterma de Freundlich; T: isoterma de Temkin; KC: isoterma de Koble-Corrigan; NR: Não relatado.

Em relação ao tratamento da casca para aplicação na adsorção, observou-se que tanto o tratamento térmico quanto o químico são amplamente utilizados, principalmente a combinação de ambos. Rosanti et al. (2022) estudaram a modificação do resíduo por meio da adição de compostos químicos e secagem à 75 °C, atingindo uma eficiência de 96% e $q_{\max}=27,78$ mg/g na retenção do Azul de Metileno. Bediako et al. (2020) trataram as cascas em 70°C e adicionaram diversos compostos químicos ao adsorvente, aplicando o produto em pó, e obtiveram 99% de eficiência e $q_{\max}=382,15$ mg/g com o azul de metileno. Jandrey (2021), Neto (2024) e Lafi, Rezma e Hafiane (2015) submeteram os materiais apenas a tratamentos térmicos, em 60, 650 e 70 °C, respectivamente. Guiza, Franck e Bagané (2018) secaram as cascas em temperatura ambiente (25°C).

Nota-se que o modelo cinético de PSO foi o que melhor ajustou-se aos dados experimentais em todos os estudos mencionados anteriormente (Quadro 3), assim como o modelo isotérmico de Langmuir. Esses resultados inferem que, ao utilizar cascas de laranja em ensaios adsorptivos, o mecanismo predominante é a quimissorção, e a adsorção ocorre, em sua maioria, em monocamadas (Du et al., 2018).

Efeito do pH, temperatura e tempo de contato

O pH é um importante parâmetro para determinar a capacidade de adsorção de um adsorvato em meio aquoso. Sua variação pode influenciar a carga superficial e o grau de ionização dos adsorventes (Penha et al., 2021). É possível constatar, com base nos trabalhos estudados, o efeito do pH no processo de adsorção dos poluentes.

De acordo com Ritter e Hassemer (2021), quando o pH é superior ao PCZ, a superfície do adsorvente apresenta carga negativa, o que facilita a adsorção de compostos catiônicos. Já em pH inferior ao PCZ, a superfície assume carga positiva, o que propicia a interação com ânions. Nesse contexto, o pH obtido por Bediako et al. (2020) para a remoção do corante azul de metileno catiônico em biocarvão de casca de laranja foi essencial para o alcance de 99% de eficiência, uma vez que o aumento do pH proporciona o aumento dos grupos OH⁻ responsáveis por ocupar os sítios ativos do adsorvente por atrações eletrostáticas (Penha et al., 2021).

Da mesma forma, o corante RB é um corante catiônico, ou seja, sua remoção tende a ser mais eficiente em meio básico, a depender do material adsorvente e das condições específicas do sistema. Pompeu et al. (2023) e Venkatesan et al. (2025) alcançaram resultados

mais interessantes em pH básico para o corante RB, enquanto Ghibate et al. (2025) e Neto (2024) apresentaram melhores desempenhos em pH neutro. Os demais estudos para o RB foram realizados em meio ácido, também atingindo bons resultados, o que provavelmente esteja relacionado a ativação das matrizes adsorvente por diferentes compostos químicos (Quadro 1).

O tempo de contato do adsorvente com a solução contendo o corante beneficiou a remoção dos contaminantes, majoritariamente sob condições de temperatura ambiente (25 °C). A temperatura afeta diretamente o processo, principalmente a velocidade de adsorção, pois o aquecimento do sistema aumenta a energia cinética e a mobilidade das espécies de adsorvato, o que intensifica a difusão intrapartícula (Orsi, 2022).

Por fim, o tempo de contato entre adsorvente e poluente determina o quão rápido ou lento o sistema atinge o equilíbrio de adsorção. A partir deste estudo, define-se a cinética de adsorção (Aliprandini, 2021). Os estudos apresentados investigaram diferentes tempos de contato e de equilíbrio (10 a 5790 min), considerando que cada trabalho aplicou distintos precursores e dosagens de adsorvente-adsorvato.

Efeito da concentração inicial do adsorvato e dosagem do adsorvente

Considera-se um sistema adsorativo ideal, em termos econômicos, aquele em que pequenas dosagens de adsorvente possibilitam um elevado teor de remoção do adsorvato, diminuindo os custos do processo (Silva et al., 2023). A capacidade de adsorção geralmente aumenta com uma dosagem maior de adsorvente, devido ao aumento da disponibilidade de sítios ativos. Entretanto, quando a dosagem excede um certo nível, a capacidade de adsorção pode diminuir pelo empilhamento de partículas, o que reduz a capacidade de remoção (Chen et al., 2022).

Venkatesan et al. (2025) e Bediako et al. (2020), que variaram a quantidade da massa do adsorvente, relatam que o aumento na dosagem do adsorvente elevou a porcentagem de remoção. Porém, o aumento ocorreu proporcionalmente, relacionado à concentração inicial do poluente. Segundo Martins et al. (2022), uma quantidade menor de adsorvente permite melhor acesso a todos os sítios ativos da superfície adsorvente e gera melhor resultado no processo final de adsorção, conforme constatado nas bibliografias revisadas.

Modelos cinéticos e isotermas de adsorção

Para os trabalhos selecionados, o modelo cinético que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de pseudo segunda-ordem (PSO). Para o corante RB, todos os estudos obtiveram ajustes melhores ao modelo PSO (Quadro 1). Para o lodo de ETA como precursor, o modelo variou entre PSO e Elovich (Quadro 2), enquanto, para a aplicação de cascas de laranja, o modelo com melhor ajuste também foi o PSO (Quadro 3). O modelo de PSO indica que ocorreu uma interação predominantemente química entre o adsorvente e o adsorvato empregado (Silva et al., 2023), fator responsável por conferir maior estabilidade ao processo.

De acordo com Penha et al. (2021), os modelos isotérmicos de adsorção refletem a interação entre adsorventes e adsorvatos e permitem estimar a capacidade máxima de adsorção. Os resultados dos estudos isotérmicos destacados anteriormente mostram que os modelos de Langmuir foram os mais adequados. O modelo de Freundlich também foi observado. A isoterma de Langmuir sugere que a superfície de um adsorvente é uniforme, sem interações entre os adsorventes e a adsorção ocorre apenas na superfície externa do adsorvente (Martins, Tavares e Rodrigues, 2023). Dessa maneira, a adsorção dos poluentes supracitados nos Quadros 1, 2 e 3, segue, na maioria dos casos, um mecanismo de monocamada.

Considerações Finais

Apesar de informações parciais ou incompletas encontradas em alguns dos artigos revisados, foi possível analisar as condições favoráveis e desfavoráveis para a remoção da RB em solução, os parâmetros envolvidos e a importância de cada para a eficiência de remoção do material adsorvente. A partir da literatura revisada tem-se que a capacidade máxima de adsorção da RB em diversos adsorventes depende das condições experimentais de adsorção, como efeito do pH da solução, da concentração inicial do adsorvato e da dosagem de adsorvente. No entanto, não se mostrou diretamente dependente da temperatura, podendo ser conduzida em condições ambiente ou controlada.

No geral, os dados experimentais dos ensaios de adsorção obtiveram melhor ajuste pelo modelo cinético de PSO e isotérmico de Langmuir. Além disso, a temperatura ambiente mostrou-se ser mais adequada aos sistemas adsorptivos, pois corresponde melhor às condições reais das águas contaminadas por corantes orgânicos.

Diante do desafio na gestão de resíduos sólidos e líquidos, a aplicação do lodo de ETA e da casca de laranja para o tratamento de águas residuárias apresenta um método de baixo custo e ambientalmente amigável, a partir de uma abordagem menos complexa e passível de escalonamento do processo para tratamento de águas contendo o corante Rodamina B.

Tanto a casca de laranja quanto o lodo de ETA configuram-se como resíduos interessantes e promissores para a remoção de corantes orgânicos, devido ao alto potencial adsorptivo. A combinação de ambos em um adsorvente híbrido para o tratamento do corante RB ainda não foi investigada, o que representa uma proposta inovadora para estudos futuros. As propriedades do lodo conferem estabilidade física e ampla área superficial ao adsorvente, enquanto as da casca de laranja tendem a aumentar a porosidade e a disponibilidade de sítios ativos.

Referências

AGOSTINHO, M. B.; HERDY, V. S.; KISS, K. E. C.; QUINÁGLIA, G. A. Adsorção de agrotóxico organofosforado por meio de farinha de casca de banana prata (Musa AAB): uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, Recife, v.9, n.3, p. 137-145, set. 2021. Disponível em: <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1012>. Acesso em 20 fev. 2025.

ALIPRANDINI, P. **Estudo da bioadsorção de cianeto de mercúrio gerado na mineração artesanal do ouro visando a descontaminação de águas residuais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-04112021-160158/pt-br.php>. Acesso em 20 jan. 2025.

BEDIAKO, J. K.; LIN, S.; SARKAR, A. K.; ZHAO, Y.; CHOI, J. W.; SONG, M. H.; CHO, C. W.; YUN, Y. S. Evaluation of orange peel-derived activated carbons for treatment of dye-contaminated wastewater tailings. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlim, v.27, p.1053–1068, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07031-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-07031-8>. Acesso em 20 jan. 2025.

BEHERA, A. K.; SHADANGI, K. P.; SARANGI, P. K. Efficient removal of Rhodamine B dye using biochar as an adsorbent: Study the performance, kinetics, thermodynamics, adsorption isotherms and its reusability. **Chemosphere**, Amsterdam, v.354, apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141702>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653524005952>. Acesso em 20 fev. 2025.

BUSHRA, R.; MOHAMAD, S.; ALIAS, Y.; JIN, Y.; AHMAD, M. Current approaches and methodologies to explore the perceptive adsorption mechanism of dyes on low-cost agricultural waste: a review. **Microporous and Mesoporous Materials**, Amsterdam, v.319, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181121001669>. Acesso em 21 fev. 2025.

CHEN, Z.; WU, Y.; HUANG, Y.; SONG, L.; CHEN, H.; ZHU, S.; TANG, C. Enhanced adsorption of phosphate on orange peel-based biochar activated by Ca/Zn composite: Adsorption efficiency and mechanisms. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v.651, n.20, oct. 2022, 129728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129728>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775722014832>. Acesso em 16 jan. 2025.

CHIENG, H. I.; LIM, L. B. L.; PRIYANTHA, N. Sorption characteristics of peat from Brunei Darussalam for the removal of rhodamine B dye from aqueous solution: adsorption isotherms, thermodynamics, kinetics and regeneration studies. **Desalination and Water Treatment**, Amsterdam, v.55, n.3, p. 664-677, jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.919609>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624048264>. Acesso em 16 jan. 2025.

DJEKOUNE, L.; SALEM, Z.; MAALIOU, A.; BOUCETTA, S.; OUAOUAK, A. Reuse of sludge from drinking water production in dye wastewater treatment of textile industry. **Desalination and Water Treatment**, Amsterdam, v. 277, nov. 2022, p. 72-84. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28962>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624109204>. Acesso em 16 fev. 2025.

DU, Y. D.; FENG, Y.; SHU, L.; REN, Z. J.; KONG, Q.; XU, F.; WANG, Q. A mesoporous biochar from bio-invasion alligator weed for adsorption of rhodamine B from aqueous solution. **Desalination and Water Treatment**, Amsterdam, v.135, p. 341-350, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22616>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S194439862415343X>. Acesso em 16 jan. 2025.

FREIRE-BOINA, R.; RAMOS-ESTEVAM, B.; FREITAS, R. F.; RODRIGUES, J. M. M.; BOINA, W. L. O.; SALES, D. H.; SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; PEREIRA, N. C. Ceramic adsorbent material in removing reactive blue bf 5G dye from synthetic wastewater. **Separation and Purification Technology**, Amsterdam, v. 331, mar.2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125555>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586623024632>. Acesso em 16 fev. 2025.

GAN, H.; ZHANG, H.; CAI, J.; JIN, H.; ZHANG, K. Bio-adsorption properties of Rhodamine B from aqueous solution onto natural camphor tree leaf powder. **Desalination and Water Treatment**, Amsterdam, v.57, n.32, p. 15241-15249, jul. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1072744>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624179921>. Acesso em 16 fev. 2025.

GHIBATE, R.; CHRACHMY, M.; KERROU, M.; BEN BAAZIZ, M.; ALAQARBEH, M.; AMECHROUQ, A.; TAOUIL, R.; SENHAJI, O. Eco-friendly adsorption of Rhodamine B dye using Punica granatum peel from an aqueous medium. **Green Analytical Chemistry**, Amsterdam, v.12, mar. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100201> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277257742400110>. Acesso em 02 fev. 2025.

GUIZA, S.; FRANCK, L.; BAGANÉ, M. Adsorption of dyes from aqueous solution under batch mode using cellulosic orange peel waste. **Desalination and Water Treatment**, Amsterdam, v.113, may 2018, p. 262-269. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22258>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624124149>. Acesso em 02 fev.2025.

JANDREY, Guilherme Alexandre. **Avaliação da adsorção de corante artificial em resíduo de laranja**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/27242>. Acesso em 23 jan.2025.

LAFI, R.; REZMA, S.; HAFIANE, A. Removal of toluidine blue from aqueous solution using orange peel waste (OPW). **Desalination and Water Treatment**, Amsterdam, v.56, n.10, p. 2754-2765, dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.982962>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624054493>. Acesso em 23 jan.2025.

MARTINS, D. S.; RAMOS-ESTEVAM, B.; PEREZ, I. D.; AMERICO-PINHEIRO, J. H. P.; ISIQUE, W. D.; FREIRE-BOINA, R. Sludge from a water treatment plant as an adsorbent of endocrine disruptors. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v.10, n.4, aug. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108090>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343722009630>. Acesso em 23 jan.2025.

MARTINS, D. S. **Produção e caracterização de material adsorvente a partir de lodo de estação de tratamento de água para a remoção de disruptores endócrinos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/dfe0ee50-b16a-4038-a04a-4d78a3feb239>. Acesso em 23 jan.2025.

MUNAGAPATI, V. S.; KIM, D.-S. Adsorption of anionic azo dye Congo Red from aqueous solution by Cationic Modified Orange Peel Powder. **Journal of Molecular Liquids**, Amsterdam, v.220, p.540-548, ago. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.04.119>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732216307693>. Acesso em 23 jan.2025.

NETO, P. F. **Avaliação do potencial de remoção de corante têxtil em efluente a partir de biocarvão da casca de laranja como adsorvente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/4d0be68e-01a5-4795-a8fe-5b4bf78b5538>. Acesso em 23 jan.2025.

NEOLAKA, Y. A. B.; BAUNSELE, S. D.; NITBANI, F. O.; DE ROZARI, P.; WIDYANINGRUM, B. A.; LAWA, Y.; AMENAGHAWON, A. N.; DARMOKOESOEMO, H.; KUSUMA, H. S. Preparation of cellulose adsorbent based on banana peel waste (Musa paradisiaca): Green activation and adsorption of Rhodamine B from the aquatic environment. **Nano-Structures & Nano-Objects**, Amsterdam, v.38, may 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101146>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352507X2400057X>. Acesso em 23 jan.2025.

ORSI, B. **Estudo cinético e de adsorção de íons metálicos em nanofibrilas de celulose**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/108e7b1d-7364-44a9-8994-9005713666d3>. Acesso em 02 fev.2025.

POMPEU, L. D.; DRUVIAN, D. M.; OVIEDO, L. R.; VIANA, A. R.; MORTARI, S. R.; PAVOSKI, G.; ESPINOSA, D. C. R.; VIZZOTTO, B. S.; FERNANDES, L. S.; DA SILVA, W. L. Adsorption of Rhodamine B dye onto novel Biochar: Isotherm, kinetic, thermodynamic study and antibiofilm activity. **Inorganic Chemistry Communications**, Amsterdam, v.158, Part 1, dec. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111509>. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387700323011218?via%3Dihub>. Acesso em 02 fev.2025.

RITTER, N. T.; NAGEL HASSEMER, M. E. Estudo do lodo de ETA contendo alumínio para a adsorção de fósforo de esgotos sanitários previamente tratados em wetlands construídos. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, UNAN, Ciudad de México, v.14, n.2, p. 860–881, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.2.75359>. Disponível em: <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/75359>. Acesso em 02 fev.2025.

SILVA, F. R. **Avaliação da eficiência de blendas de biocarvão com lodo de decantação de Estação de Tratamento de Água (ETA) na adsorção de soluções de azul de metileno.**

Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2018.

Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/a8ad445e-8feb-4022-990e-3714aa546d5a>. Acesso em 02 fev.2025.

SOUZA, C. D. R. DE; CARVALHO, S. F. Avaliação da cinética de adsorção do Negro de Eriocromo T em carvão ativado produzido a partir do lodo de ETA. **Scientia Amazonia**,

Manaus, v.9, n.1, p. C1-C7, 2020. Disponível em: <https://scientia-amazonia.org/wp-content/uploads/2020/04/v9-n1-C1-C7-2020.pdf>. Acesso em 16 fev. 2025.

VENKATESAN, A.; SRIVIDHYA, B.; ALAJMI, A.; SADEQ, A. M.; CHAVA, R. K.; HABILA, M. A.; KUMAR, D. S.; GUGANATHAN, L.; RAGUPATHY, S. High adsorption capacities of rhodamine B dye by activated carbon synthesized from cotton stalks agricultural waste by chemical activation. **Ceramics International**, Amsterdam, v.51, n.10, p.13345-13354, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.01.178>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884225002056>. Acesso em 16 fev. 2025.

ZHANG, W.; WEN, L.; WANG, W.; XIANG, W.; LAI, C. Enhanced adsorption and photodegradation of rhodamine B by BiFeO₃ nanoparticles functionalized yeast composite: Synthesis, performance, and mechanism. **Journal of Water Process Engineering**, Amsterdam, v.68, dec.2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106296>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714424015289?via%3Dihub>. Acesso 12 fev.2025.