

INVESTIGAÇÃO NO PROCESSO DE ADSORÇÃO DE CORANTES REATIVOS POR CINZAS LEVES E CARVÃO ATIVADO COMERCIAL E A OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS E SUA INFLUÊNCIA

INVESTIGATION INTO THE ADSORPTION PROCESS OF REACTIVE DYES BY LIGHT ASHES AND COMMERCIAL ACTIVATED CARBON AND THE OPTIMIZATION OF OPERATIONAL VARIABLES AND THEIR INFLUENCE

INVESTIGACIÓN SOBRE EL PROCESO DE ADSORCIÓN DE COLORANTES REACTIVOS POR CENIZAS LIGERAS Y CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL Y LA OPTIMIZACIÓN DE VARIABLES OPERACIONALES Y SU INFLUENCIA

Luiz Eduardo Freitas de Moura¹
Emyllene Ricelly Dantas²
José Edvaldo de Lima Junior³
Francisco Igo Leite Soares⁴
André Anderson Costa Pereira⁵
Humberto Neves Maia de Oliveira⁶

RESUMO: Este trabalho investigou a otimização das variáveis no processo de adsorção dos corantes reativos vermelho e azul s-matrix 150, com soluções de um efluente contaminado. Utilizaram-se cinzas oriundas do carvão da pirólise, promovendo o beneficiamento desse material de baixo valor agregado e sem aplicação real. O carvão ativado comercial foi utilizado como parâmetro devido a sua eficácia consolidada. Foi realizado um ensaio preliminar, com parâmetros pré-estabelecidos, até o tempo de equilíbrio do sistema, seguido da otimização das variáveis operacionais (pH, massa do adsorvente e concentração inicial do adsorvato). Os dois materiais demonstraram desempenho significativo na remoção dos corantes, com destaque para o carvão ativado comercial que obteve melhores resultados no corante azul s-matrix 150, enquanto as cinzas obtiveram melhores resultados no corante vermelho s-matrix 150. Ambos os materiais atingiram patamares próximos a 100%, evidenciando as suas respectivas afinidades. O processo de busca pelas condições ótimas revelou que as variáveis afetam diretamente a eficiência do processo, em que tais fenômenos evidenciam situações como saturação dos sítios ativos. Portanto, as cinzas se mostram como uma alternativa sustentável e de baixo custo ao carvão ativado comercial, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente mais corretas ao tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Adsorção. Corantes reativos. Tratamento de águas. Cinzas leves.

¹Mestre em Engenharia Química, Analista Químico na SGS GEOSOL .

²Discente do curso de Mestrado Profissional em Administração Pública na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

³Doutor em Física.

⁴Doutor em Ciências Ambientais e Docente na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

⁵Doutor em Engenharia Química e Docente na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

⁶Doutor em Engenharia Química e Docente na Universidade Federal do Rio Grande do Norte

ABSTRACT: This study investigated the optimization of operational variables in the adsorption process of reactive red and blue S-Matrix 150 dyes from contaminated effluent solutions. Coal pyrolysis ash was used, enabling the valorization of a low-value material with no prior practical application. Commercial activated carbon was employed as a benchmark due to its well-established effectiveness. A preliminary test was conducted under pre-established conditions until the system reached equilibrium, followed by the optimization of operational variables (pH, adsorbent mass, and initial adsorbate concentration). Both materials demonstrated significant dye removal performance, with commercial activated carbon showing superior results for the blue S-Matrix 150 dye, while the ash exhibited better performance for the red S-Matrix 150 dye. Both adsorbents achieved removal efficiencies close to 100%, highlighting their respective affinities. The search for optimal conditions revealed that the variables directly affect process efficiency, with phenomena such as active site saturation becoming evident. Therefore, coal pyrolysis ash emerges as a sustainable and low-cost alternative to commercial activated carbon, contributing to the development of more environmentally friendly technologies for wastewater treatment.

Keywords: Adsorption. Reactive dyes. Water treatment. Light ash.

RESUMEN: Este trabajo investigó la optimización de las variables en el proceso de adsorción de los colorantes reactivos rojo y azul S-Matrix 150, a partir de soluciones de un efluente contaminado. Se utilizaron cenizas provenientes del carbón de pirólisis, promoviendo la valorización de este material de bajo valor agregado y sin aplicación práctica. El carbón activado comercial fue utilizado como referencia debido a su eficacia consolidada. Se llevó a cabo un ensayo preliminar, con parámetros preestablecidos, hasta alcanzar el tiempo de equilibrio del sistema, seguido de la optimización de las variables operativas (pH, masa del adsorbente y concentración inicial del adsorbato). Ambos materiales demostraron un desempeño significativo en la remoción de los colorantes, destacándose el carbón activado comercial, que obtuvo mejores resultados para el colorante azul S-Matrix 150, mientras que las cenizas presentaron mejores resultados para el colorante rojo S-Matrix 150. Ambos materiales alcanzaron niveles cercanos al 100 %, lo que evidencia sus respectivas afinidades. El proceso de búsqueda de las condiciones óptimas reveló que las variables afectan directamente la eficiencia del proceso, evidenciándose fenómenos como la saturación de los sitios activos. Por lo tanto, las cenizas se presentan como una alternativa sostenible y de bajo costo al carbón activado comercial, contribuyendo al desarrollo de tecnologías ambientalmente más adecuadas para el tratamiento de efluentes.

Palabras clave: Adsorción. Colorantes reactivos. Tratamiento de águas. Cenizas ligeras.

INTRODUÇÃO

O processo de tingimento remonta à Antiguidade, quando povos antigos utilizavam-se de cascas de árvores e outros materiais para tingir tecidos. Com o passar dos anos, esse processo foi se modernizando e fazendo com que grandes indústrias químicas fossem surgindo e se aprimorando nesse cenário.

Atualmente, essa indústria produz uma grande quantidade de rejeitos que podem acabar sendo descartados em locais inapropriados ou até ocasionar acidentes que resultem em contaminações de corpos d'água. Costa DMA e Melo JJS (2018) acrescentam que no ano de 2003,

o setor produziu cerca de 700 mil toneladas de corante, dos quais 30% foram descartados de forma inapropriada.

O descarte inadequado desses produtos em corpos hídricos e em solos resulta na liberação de agentes químicos nocivos, que possuem em sua composição surfactantes, sais inorgânicos e metais pesados, além de compostos com antraquinonas e compostos do grupo azo, que são altamente cancerígenos (AL-TOHAMY R, et al., 2022; KHAN WU, et al., 2022; AZANAW A, et al., 2022).

As metodologias de tratamento de efluentes são diversificadas e englobam desde processos químicos, como os realizados em estações de tratamento de água, até técnicas que envolvem energias solares e radiação ultravioleta. Mas, diante da necessidade de alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis, o processo de adsorção destaca-se como uma opção promissora.

O tratamento de águas por meio desse procedimento apresenta-se uma alternativa inteligente, tendo em vista que o material adsorvente pode ser confeccionado com produtos de baixo custo. Silva SKC, et al., (2022) em seu trabalho de remoção do corante reativo azul BF-5G, utilizaram casca de mandioca e obtiveram resultados próximos dos 90% de remoção.

O presente trabalho partiu do ensaio cinético de adsorção até o equilíbrio, e partindo dos valores encontrados, foi possível investigar a otimização do processo de adsorção, ou seja, uma melhoria nas variáveis do procedimento, objetivando uma melhor remoção do contaminante. Nesse contexto, foram investigados fatores como influência do pH, massa do adsorvente, concentração do adsorvato e suas contribuições no processo de adsorção dos corantes reativos “vermelho e Azul S-matrix 150”, utilizando cinzas do carvão da pirólise do capim elefante brutas (CZPB) e carvão ativado comercial (CAC), como parâmetros de referência.

MÉTODOS

Para o processo estudado, os adsorventes foram produzidos previamente, partindo da matéria prima existente (o carvão do rejeito da pirólise). Esse carvão foi levado ao forno, tipo mufla, a 800^o C, por 5 h e, em seguida, foi retirado o material que sobrou após a calcinação. Esse material eram as cinzas leves, material composto, majoritariamente, de Si e Al.

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

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

(1)

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

(2)

$$\%R = \frac{(Co - Ce) \times 100}{Co}$$

(3)

As fórmulas supracitadas são utilizadas no tratamento dos dados durante o processo de batelada.

Para o estudo das variáveis, procedeu-se à investigação, deixando todas constantes exceto aquela que iria variar. Para o estudo do pH, a massa do adsorvente e a concentração da solução de corantes foram preservados.

Essas variáveis foram utilizadas nas condições iniciais pressupostas com base em artigos científicos. De acordo com Simões VN (2023), utilizou-se de 0,3g de adsorvente, 0,075L de solução, com os corantes a concentração de 40mg/L e o pH sendo igual ao pH da própria solução, que é 6.

Logo após fixar esses dados, o pH foi a primeira variável estudada, em uma faixa de variação que compreende os intervalos de 2,6 e 8.

Já para a massa do adsorvente, foi fixado o melhor pH encontrado no ensaio anterior e se manteve fixado o valor da concentração do adsorvato. A massa do adsorvente variou entre 0,3g, 0,5g e 1g.

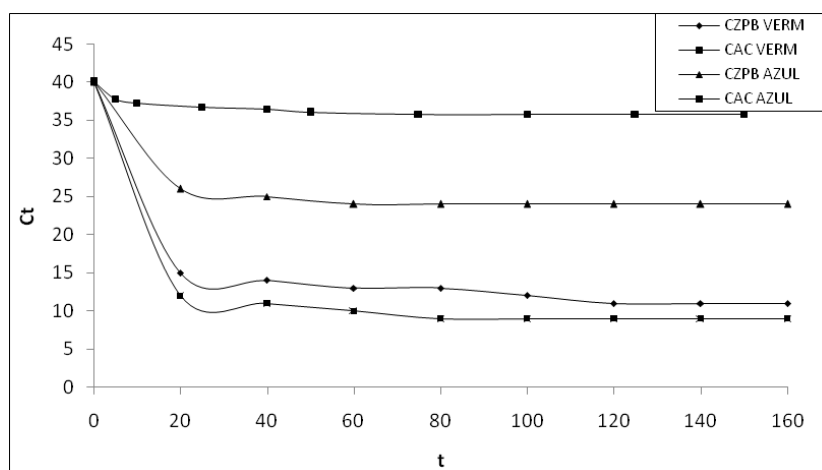
E para o estudo da melhor concentração para a remoção, as variáveis anteriores foram fixadas nas melhores condições encontradas. E a concentração do corante variou de 10, 20, 50 e 60mg/L.

Esses ensaios foram realizados em duplicata e o processo dinâmico aconteceu em uma mesa agitadora do tipo Shaker, de marca Tecnal, a uma rotação de 140 Rpm e erlenmeyer de 250ml, onde, após intervalos de tempo, as duplicatas dos erlenmeyer eram retirados do shaker e centrifugados. Logo em seguida, eram levados ao espectrofotômetro de UV/vis, a fim de analisar a sua absorbância e determinar a sua concentração, por meio de uma curva de calibração produzida previamente. Durante o intervalo de tempo estabelecido, após o primeiro experimento do estudo cinético até o equilíbrio, que seguia a mesma metodologia descrita anteriormente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme apresentado na metodologia, o primeiro experimento ocorreu nas condições iniciais de massa de adsorvente igual a 0,3g, uma concentração inicial do contaminante de 40mg/L e um pH 6. O Gráfico 1, a seguir, é relativo ao processo de remoção onde temos C_t , que é concentração, no tempo “t”, versus o tempo do processo, em que é possível observar e comparar a adsorção das cinzas produzidas em relação aos valores de adsorção do carvão ativado comercial. Nele podemos observar que a maior parte adsorvida ocorre nos primeiros 40 min e que depois disso a adsorção se torna mais lenta, até chegar ao equilíbrio de remoção.

Gráfico 1 - Adsorção dos corantes Vermelho e azul S-matrix 150



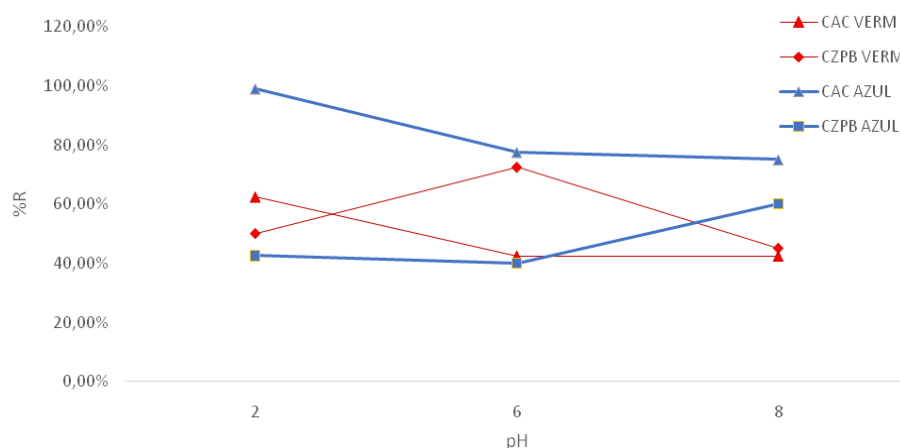
Fonte: Moura LEF, et al., 2026.

Ao analisarmos as remoções dos corantes de forma individual, a CZPB obteve melhores resultados da remoção no corante vermelho S-matrix 150, enquanto o CAC obteve resultados de remoções superiores no corante azul S-matrix 150, indicando que a afinidade do carvão ativado é melhor para o corante azul e as cinzas para o corante vermelho. Partindo desses resultados, buscou-se uma forma de melhorar o percentual de remoção desses contaminantes.

Posteriormente aos ensaios de remoção até o ponto de equilíbrio, a primeira variável estudada foi o pH. De acordo com Zhang W, et al., (2023), o estudo de otimização do pH é um fator crucial em alguns processos, pois encontra-se diretamente ligado a estabilização de cargas dispersas no sistema, dessa forma a eficiência da adsorção está diretamente ligada ao pH e outras variáveis. Para Oliveira JD, et al., (2024), em seu estudo de adsorção, utilizando borra do café, foi encontrado o pH 5 como ideal, pois com ele as ligações de hidrogênio foram quebradas e os íons liberados, sendo substituídos pelos metais adsorvidos.

Nesse contexto, o estudo do pH “ótimo” solidifica-se como uma variável importante no processo de adsorção e os resultados obtidos dos adsorventes nos dois corantes pode ser observado no gráfico 2, a seguir.

Gráfico 2 - Estudo da influencia do pH

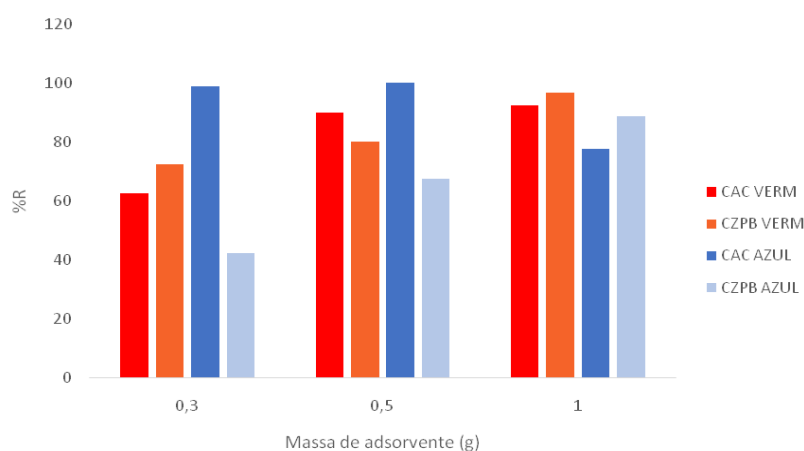


Fonte: Moura LEF, et al., 2026.

O gráfico é resultado dos estudos da influência do pH, ao se observar a CZPB pode-se concluir que, para o corante vermelho, ela apresenta melhores resultados com o pH 6, ou seja, o pH inicial da solução, enquanto para o corante azul, seus melhores resultados são em pH 8. Em contrapartida, o carvão ativado comercial apresenta melhores resultados para corante vermelho e o corante azul, no pH ácido 2. Além disso, para o corante vermelho é notório o aumento da adsorção. Essas mudanças nos valores de remoção, em decorrência da alteração, podem sugerir que as ligações possuem um cunho mais químico, como aponta Oliveira JD, et al., (2024) em seu trabalho, no qual, ao modificar o pH da solução, é possível mexer nas cargas presentes no corante, dessa forma, tornando mais fácil o processo de depósito do adsorvato na superfície do adsorvente.

Em seguida podemos observar o estudo da influência da massa de adsorvente, no gráfico 3.

Gráfico 3 - Influencia da massa de adsorvente



Fonte: Moura LEF, et al., 2026.

O aumento nos valores adsorvidos com o aumento da massa de adsorvente é, de certa forma, lógica, quando pensa-se que se houver uma quantidade maior de adsorvente maior será o material removido, pois os sítios ativos vão aumentar, por consequência da maior quantidade de massa de cinzas e carvão. Kurniasih M, et al., (2025) ao aumentar a quantidade de cinzas na remoção do seu corante, obtiveram um aumento de 30% em relação a remoção com a massa inicial.

Entretanto, quando o CAC no corante azul, podemos notar que com o aumento de massa, a quantidade de corante removida diminui. Para casos na regressão da adsorção do contaminante, mesmo com o aumento da massa, pode ser um indicativo de uma aglomeração de partículas que acabam impedindo o adsorvato de se depositar nos sítios ativos do adsorvente (HOLLAS S, et al., 2020; PRIGOL GS, 2018). Dessa forma, destaca-se a importância de averiguar as condições operatórias para a validação das variáveis ideais, em que, estas conseguem influenciar melhor os resultados.

A seguir, na Tabela 1, temos os valores comparativos das porcentagens de remoção dos corantes com as condições iniciais e finais, além de comparar a porcentagem de remoção dos corantes, variando a concentração do adsorvato.

Tabela 1 - Compilado dos resultados e comparativos do inicial com o final

Adsorventes	% R inicial	% R Final	q _e inicial (mg/g)	q _e Final (mg/g)	%R C ₁ 40mg/L	%R C ₂ 60mg/L
CZPB Vermelho	72,5%	96,75%	7,25 mg/g	9,67 mg/g	96,75%	83,3%
CZPB Azul	40%	88,75%	4,0 mg/g	8,87 mg/g	88,75%	94,3%
CAC Vermelho	42,5%	92,5%	4,25 mg/g	9,25 mg/g	92,5%	93,3%
CAC Azul	77,5%	99,97%	7,75 mg/g	9,99 mg/g	99,97%	99,2%

Fonte: Moura LEF, et al., 2026.

Tem-se %R como o percentual de remoção, q_e é a capacidade de adsorção C₁ e C₂ são concentrações.

Por fim, os resultados obtidos tornam evidentes diferenças significativas nos valores iniciais obtidos e nos valores finais, após a otimização dos parâmetros variáveis do processo de adsorção. Também pode-se destacar que o CAC apresenta um desempenho superior em relação ao CZPB no corante azul, com valores de %R próximos à remoção total do contaminante e possuindo uma capacidade de adsorção de 9,99 mg/g. Uma capacidade de adsorção assim sugere que esse adsorvente tem uma afinidade maior com esse corante, além de uma maior densidade de sítios ativos ou condições químicas mais favoráveis em sua superfície. Já quando falamos do corante vermelho a CZPB, esse obtém melhor desempenho, indicando que sua afinidade é maior com esse corante do que com o corante azul, demonstrando tanto no % de remoção, quanto na sua capacidade de remoção.

Ao analisarmos os percentuais de remoção de outros trabalhos na literatura, pode-se constatar que as cinzas leves estão em bons patamares de remoção. Leal PVB, et al., (2012) obteve por volta de 80% de remoção do azul de metileno, utilizando resíduos de babaçu, já Gouveia-Ramos RJL, et al., (2025) obteve uma remoção de 43,09% do corante em meio ácido. Portanto, os valores obtidos no processo de adsorção encontram-se em uma faixa de resultados bastante promissores.

Além disso, quando foi analisada a variação de concentração inicial de adsorvato de 40 mg/L para 60 mg/L, o CZPB no corante vermelho e o CAC no corante azul obtiveram reduções em seus percentuais de remoção, o que pode ser atribuído a saturação precoce de seus sítios ativos, tendo em vista que eles possuem maior afinidade pelos respectivos corantes. Já para o CZPB no corante azul e o CAC no corante vermelho, obtiveram um aumento no seu percentual

de remoção, possivelmente em decorrência da maior quantidade disponível e na demora a saturar os sítios ativos disponíveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o processo de adsorção apresenta-se como uma alternativa eficiente para a remoção de contaminantes, especialmente quando se utilizam materiais de baixo custo ou resíduos industriais. Ao comparar os dois adsorventes estudados, evidenciamos diferenças pontuais em seus desempenhos, tanto em termos de remoção quanto em capacidade adsorviva.

De modo geral, o carvão ativado apresentou resultados mais satisfatórios na remoção do corante azuis S-matrix 150. Em contrapartida, as cinzas obtiveram melhor desempenho no corante vermelho, sugerindo que esse material possui uma superfície mais atrativa ao corante vermelho. Resultados como esses reforçam as diferenças nas influências das superfícies e nos seus sítios ativos, bem como no mecanismo de adsorção.

Alguns aspectos químicos não foram mais aprofundados em decorrência do não conhecimento das estruturas dos corantes por estarem em segredo industrial.

Diante do exposto, conclui-se que as cinzas apresentam um potencial semelhante ao do carvão ativado comercial, tendo em vista que o carvão já é um material consolidado em pesquisas e aplicações industriais. No entanto, estudos adicionais são necessários, incluindo modelos cinéticos, como o pseudo 1ª ordem e 2ª ordem, e modelos isotérmicos, como Langmuir e Freundlich, a fim de conhecer melhor a natureza do processo, se ele é uma adsorção física ou química. Ademais, a realização de estudos termodinâmicos, para determinar a temperatura ideal de operação, contribuindo para a ampliação das possibilidades e aplicações desses materiais.

AGRADECIMENTOS E FINANCIAMENTO

Agradecemos a CAPES pelo aporte financeiro durante todo o período da pesquisa.

REFERÊNCIAS

AL-TOHAMY R, et al. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2022; v. 231, p. 113160.

AZANAW A, et al. Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case studies in chemical and environmental engineering*, 2022; v. 6, p. 100230.

COSTA DMA, MELO JJS. Estudo da capacidade de remoção de azul de metileno pela biomassa da casca do limão taiti (*Citrus latifolia*). *Holos Environment*, 2018; v. 18, n. 2, p. 271-282.

GOUVEIA-RAMOS RJL, et al. Caracterização, análise quimiométrica e ensaios preliminares de adsorção de corantes têxteis em celulose bacteriana: uma tecnologia para tratamento de efluentes com proposta para desenvolvimento de economia sustentável. *Química Nova*, 2025; v. 48, p. e-20250136.

HOLLAS S, et al. Adsorção de diclofenaco de sódio com uso de carvão ativado de bagaço de cana-de-açúcar. In: ANAIS DO 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2021, Gramado. *Anais eletrônicos...*, Galoá, 2021.

KHAN WU, et al. A critical review of hazardous waste generation from textile industries and associated ecological impacts. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2023; v. 100, n. 1, p. 100829.

KURNIASIH M, et al. Modification of coal fly ash for high capacity adsorption of methylene blue. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2025; v. 11, p. 101101.

LEAL PVB, et al. Estudo da adsorção do corante azul de metileno em resíduos de babaçu. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 2012; v. 3, n. 4.

OLIVEIRA JD, et al. M. Borra do café: capacidade biosortiva dos íons Zn^{2+} e Ni^{2+} e estudo cinético. *Caderno Pedagógico*, 2024; [S. l.], v. 21, n. 12, p. e11179.

PRIGOL GS. Adsorção de diclofenaco sódico em carvão ativado. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018; 34 p. 10

SILVA SKC, et al. Adsorção de corante azul reativo BF-5G utilizando casca de *Manihot Esculenta* Crantz. *Revista Matéria*, 2022; v. 27, n. 1, p. e13146.

SIMÕES VN. 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. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023; 137 p.

ZHANG W, et al. Otimização da síntese e modelagem da adsorção de biochar para remoção de poluentes via aprendizado de máquina. *Biochar* 5, 2023; 25.