Adsorção de contaminante emergente utilizando hidrochar e biomassa impregnada com nanopartículas metálicas derivados de *Moringa oleifera*

João Victor Silva Baddini[1], Lorena dos Santos Nunes[1], Lígia Megumi Okano[1], Luís Fernando Cusioli[1], Rosângela Bergamasco[1], Angélica Marquetotti Salcedo Vieira[1]

[1]Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (email: joaobaddini@hotmail.com)

Resumo: A presença de contaminantes emergentes, como fármacos, pesticidas e produtos de higiene, compromete a qualidade da água e desafia tratamentos convencionais. Entre eles, a sertralina destaca-se pela persistência e toxicidade. Neste estudo, a casca de moringa foi aplicada como adsorventes sustentável, incluindo hidrochar obtido por carbonização hidrotérmica e impregnação verde com ferro. Os materiais h-MO e MO-Fe/S.V apresentaram capacidades de 12,5 e 9,5 mg g^{-1}.

Palavras-chave: Contaminantes emergentes; Adsorção sustentável; Hidrochar; Remediação ambiental; biomassa lignocelulósica.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para a manutenção da vida, desenvolvimento econômico e equilíbrio ambiental. Entretanto, o crescimento populacional acelerado, associado à expansão industrial e urbana, tem intensificado a pressão sobre os recursos hídricos, comprometendo a disponibilidade e a qualidade da água em diferentes regiões do mundo (Wang *et al.*, 2026). A contaminação hídrica está diretamente relacionada ao aumento de doenças de veiculação hídrica, como febre tifóide, cólera e disenterias, afetando principalmente populações em situação de vulnerabilidade social e com acesso limitado a sistemas adequados de saneamento, segundo a World Health Organization, estima-se que aproximadamente 505 mil mortes por doenças diarreicas ocorram anualmente em decorrência do consumo de água contaminada (Agbasi *et al.*, 2026; Rodríguez *et al.*, 2026). Paralelamente, o perfil químico dos corpos hídricos tornou-se cada vez mais complexo devido à introdução contínua de compostos antropogênicos oriundos de atividades domésticas, hospitalares, industriais e agrícolas. Embora os sistemas convencionais de tratamento de água e efluentes desempenhem papel fundamental na redução de matéria orgânica e microrganismos patogênicos, muitos desses contaminantes persistem mesmo após o tratamento. Isso ocorre porque diversos compostos sintéticos produzidos pelo ser humano apresentam estruturas químicas recalcitrantes, que não fazem parte dos ciclos naturais de degradação biológica desenvolvidos ao longo da evolução dos ecossistemas. Dentro desse contexto destacam-se os contaminantes emergentes, grupo que engloba pesticidas, herbicidas, produtos de higiene pessoal e, principalmente, os fármacos (Chawla, Singh e Haritash, 2024; Díaz-Montaña *et al.*, 2026).

Entre os fármacos frequentemente detectados em águas superficiais e residuárias destaca-se a sertralina, um antidepressivo pertencente à classe dos inibidores seletivos da recaptação de serotonina. Este medicamento é amplamente utilizado no tratamento de depressão, transtornos de ansiedade, síndrome do pânico e transtorno obsessivo-compulsivo, atuando diretamente no sistema nervoso central por meio da modulação da neurotransmissão serotoninérgica. Nas últimas décadas, fatores sociais, econômicos e comportamentais têm contribuído para o aumento expressivo do consumo de medicamentos voltados à saúde mental, cenário intensificado após a pandemia de COVID-19, período marcado pelo crescimento de quadros de ansiedade, estresse e depressão (Beltran *et al.*, 2025). Parte significativa da sertralina administrada não é completamente metabolizada pelo organismo humano, sendo excretada via urina e fezes, alcançando sistemas de esgoto e, consequentemente, corpos hídricos receptores. Além disso, o descarte inadequado de medicamentos em residências, hospitais e unidades de saúde contribui para a manutenção desse contaminante no ciclo ambiental. Estudos já demonstram que a presença de sertralina em ambientes aquáticos pode provocar efeitos tóxicos em organismos não alvo, além de alterações fisiológicas e comportamentais em espécies aquáticas (Laimou-Geraniou *et al.*, 2025; Lumor *et al.*, 2026).

Diante desse cenário, a adsorção vem sendo amplamente investigada como alternativa promissora

para a remediação de contaminantes emergentes em água. Trata-se de uma operação unitária tradicional utilizada em diferentes setores industriais, mas que ganhou destaque na área ambiental devido à elevada eficiência de remoção, simplicidade operacional e menor custo quando comparada a tecnologias avançadas, como processos oxidativos avançados, separação por membranas, foto-Fenton e outras técnicas de alto consumo energético (Bello, Abdul Raman e Purushothaman, 2017; Cusioli *et al.*, 2020). A adsorção consiste em um fenômeno de superfície envolvendo duas fases: um sólido denominado adsorvente e uma espécie química presente na fase líquida, chamada adsorvato. Durante o processo, as moléculas contaminantes são transferidas e retidas na superfície do adsorvente por mecanismos físicos e químicos, promovendo a purificação da água. A elevada área superficial, presença de poros e disponibilidade de grupamentos funcionais tornam os materiais adsorventes capazes de atuar como sistemas eficientes de captura molecular. Nesse contexto, biossorventes obtidos a partir de biomassas residuais têm despertado grande interesse devido à ampla disponibilidade, baixo custo e caráter sustentável. Entre as estratégias mais promissoras destaca-se a produção de hidrochar via carbonização hidrotérmica, processo capaz de converter resíduos lignocelulósicos em estruturas carbonáceas utilizando temperaturas moderadas e menor demanda energética quando comparado aos métodos convencionais de carbonização. Além disso, a impregnação de nanopartículas metálicas pode ampliar a capacidade adsortiva e modificar propriedades superficiais do material, favorecendo mecanismos específicos de interação entre adsorvente e contaminante.

A moringa apresenta elevado potencial para aplicação como biossorvente devido à composição lignocelulósica, presença de grupos funcionais ativos e abundância como resíduo agrícola. Tanto a biomassa in natura quanto materiais derivados, como o hidrochar, vêm demonstrando resultados promissores em processos de remediação ambiental. Associado a isso, o uso de extrato de folhas de moringa em rotas de síntese verde para impregnação metálica representa uma alternativa sustentável para obtenção de materiais modificados, reduzindo o emprego de reagentes tóxicos e promovendo maior compatibilidade ambiental no processo de produção. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da biomassa de moringa impregnada com nanopartículas metálicas e do hidrochar obtido por carbonização hidrotérmica na remoção de sertralina em sistemas descontínuos de adsorção, buscando compreender os mecanismos envolvidos no processo e a influência de diferentes rotas de síntese sobre o desempenho adsortivo dos materiais.

MATERIAL E MÉTODOS

A casca, sementes e folhas de moringa foram coletadas e separadas. A casca foi lavada, seca, triturada e peneirada para obtenção de granulometria entre 0,6 e 1 mm, seguida de pré-tratamento térmico a 150 ºC por 2 h e ativação ácida com HNO_3 0,1 M em proporção 1:10 (m/v, g/mL). Após essa etapa, os materiais seguiram diferentes rotas de síntese. Para obtenção do material MO-Fe/S.V, a biomassa (semente da Moringa Oleifeia) foi impregnada com solução 0,1 M de nitrato de ferro ($Fe(NO_3)_3$, precursor de Fe III) em proporção 1:10 (m/v) e submetida à agitação orbital por 24 h. Em seguida, foi incorporado extrato aquoso das folhas de moringa obtido por ultrassonicação, onde 5 g de folha seca foi misturada a 70 mL de água destilada, atuando como agente redutor na síntese verde das nanopartículas metálicas. O material foi novamente mantido sob agitação, lavado até pH próximo da neutralidade e seco. Para produção do hidrochar (h-MO), 5 g dos grânulos obtidos pelo pré-tratamento foi submetida à carbonização hidrotérmica em reator hidrotermal a 150 ºC utilizando 50 mL de água como meio reacional (1g/10 mL de água) por 24 h.

Os materiais sintetizados foram aplicados na remoção de contaminantes emergentes em sistemas descontínuos de adsorção. Inicialmente, realizou-se uma batelada preliminar utilizando 20 mL de solução 20 mg L^{-1} de cloroquina (CLQ), cafeína (CAF), fluoxetina (FLX) e sertralina (STL), empregando 20 mg de adsorvente em agitação orbital por 24 h. Posteriormente, foram conduzidos ensaios de massa utilizando 20, 30 e 40 mg de material em solução de sertralina (20 mg L^{-1}), além de estudos de influência do pH em valores 4, 7 e 9 ajustados com NaOH 0,1 M. Também foram realizados ensaios cinéticos até o equilíbrio, sob agitação constante de 150 rpm, temperatura de 25 ºC e condições experimentais ótimas obtidas nos ensaios anteriores.

Ao final dos ensaios adsortivos, realizou-se a separação das fases sólida e líquida, sendo a fase sólida correspondente ao adsorvente contendo o contaminante adsorvido e a fase líquida referente à concentração residual do contaminante não removido. Posteriormente, as amostras foram filtradas em filtro de celulose com abertura de poro de 0,2 µm e analisadas por espectrofotometria UV-Vis. A concentração residual dos contaminantes foi determinada por meio de curvas de calibração previamente estabelecidas, correlacionando os valores de absorbância com as respectivas concentrações. A partir dos resultados obtidos, foram calculadas a capacidade adsortiva (q_e) e a porcentagem de remoção (%R), parâmetros utilizados para avaliação da

eficiência e do comportamento do processo de adsorção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Síntese.

Primeiramente, na figura 1a é possível observar a casca da moringa antes e depois da etapa de síntese. Na figura 1b é demonstrado os grupamentos funcionais típicos de materiais lignocelulósicos, como descrito por Reck et al. (2018), que ao caracterizar o material por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) detectou a presença dos grupamentos hidroxila e carboxila, que influenciam na presença de ligações favoráveis para contaminantes catiônicos. Já com relação ao hidrochar a figura 2 esquematiza a etapa de síntese deste material, e a partir da reação é possível obter um material com características parecidas com o carvão ativado obtido por pirólise, mas com baixo custo energético e ciclo sustentável, como descrito por Ho e Trinh, (2026). Esses parâmetros estruturais e químicos comprovam o potencial da casca da moringa como adsorvente, devido à presença de grupamentos funcionais que favorecem a remoção de contaminantes com carga superficial positiva.



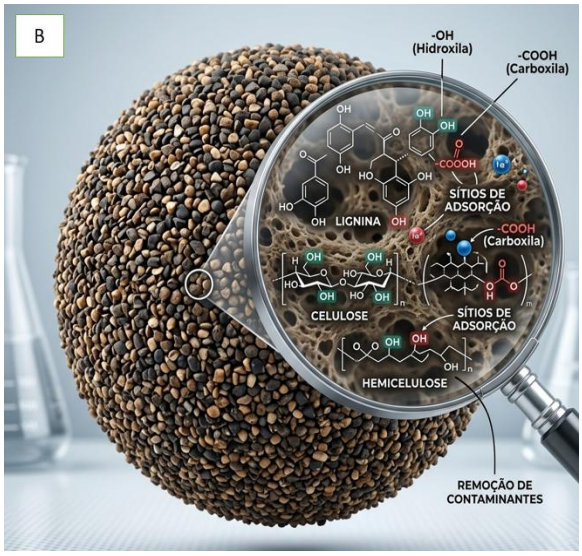


Figura 1. Esquema da etapa de síntese do material MO-Fe (S.V) (a) grânulos formados da síntese (b) presença dos grupamentos funcionais



Figura 2. Esquema da etapa de síntese do material h-MO.

Batelada preliminar.

Inicialmente, foi realizado um ensaio preliminar em batelada com o objetivo de avaliar previamente a associação adsorvente/adsorvato, considerando que a adsorção consiste em um processo altamente específico e dependente da interação entre material adsorvente e contaminante. Assim, buscou-se

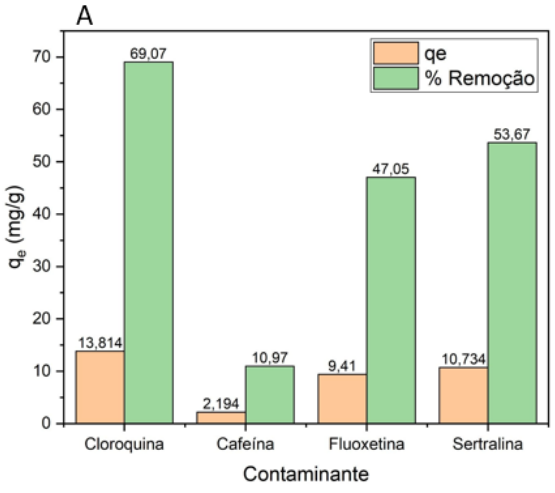
investigar a melhor sinergia entre os materiais produzidos e os contaminantes emergentes selecionados.

Para isso, avaliou-se a capacidade adsortiva (q_e) e a porcentagem de remoção (%R) de cada contaminante na presença de 20 mg dos adsorventes MO-Fe/S.V e h-MO conforme figura 3 seguindo equações 1 e 2, onde C_0 é a concentração inicial (antes da adsorção, mg L^{-1}) e C_e a concentração residual (sendo a concentração lida em espectroscopia após processo de adsorção, dada em mg L^{-1}), V é o volume de contaminante (mL) e m a massa de adsorvente (mg). Os melhores resultados de capacidade adsortiva para ambos os materiais foram observados para a cloroquina, apresentando valores de 13,814 mg g^{-1} para o MO-Fe/S.V e 14,502 mg g^{-1} para o h-MO. Entretanto, os resultados obtidos para a sertralina apresentaram desempenho relativamente próximo, destacando-se como um contaminante de maior relevância ambiental e crescente preocupação científica, principalmente em regiões sem incidência significativa de malária (principal uso para a cloroquina).

$$qe = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

$$\%R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} * 100$$

Dessa forma, optou-se pela seleção da sertralina como composto-modelo para os demais ensaios de adsorção. Ademais, os resultados preliminares já evidenciaram o potencial dos materiais sintetizados para aplicação na remediação de contaminantes emergentes, uma vez que foram observadas remoções de 53,67 % para o material impregnado com nanopartículas e 57,4 % para o hidrochar.



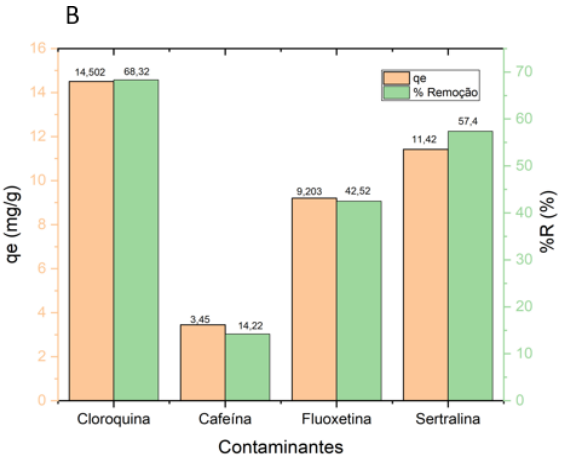


Figura 3. Capacidade adsortiva (qe, mg g^{-1}) e porcentagem de remoção (%R, %) para (a) Casca da *Moringa oleifera* impregnada com nanopartículas de Ferro por rota de síntese verde e (b) hidrochar da Casca da *Moringa oleifera*. Parâmetros: (m_{ads} = 20 mg, V_{cont} = 20 mL, C_0 = 20 mg g^{-1}, pH natural, T = 25 ºC e agitação 150 rpm)

Ensaio de massa.

As Figuras 4 e 5 apresentam os gráficos representativos para os materiais MO-Fe/S.V e h-MO, respectivamente.

Observou-se que a capacidade adsortiva diminuiu com o aumento da dosagem de adsorvente, indicando subutilização do material em maiores massas, uma vez que o aumento da quantidade de adsorvente não é acompanhado linearmente pela taxa de difusão do contaminante no meio. Em contrapartida, a porcentagem de remoção apresentou aumento com a elevação da dosagem, devido ao maior número de sítios ativos disponíveis para interação com o adsorvato.

A dosagem ótima foi determinada a partir do ponto de intersecção entre as curvas de capacidade adsortiva e porcentagem de remoção, resultando em um valor de 28 mg para ambos os materiais. Esse comportamento semelhante indica que, apesar das diferentes rotas de síntese empregadas, a biomassa da casca de moringa manteve características estruturais próximas, sugerindo distribuição e densidade de poros relativamente uniformes entre os adsorventes obtidos.

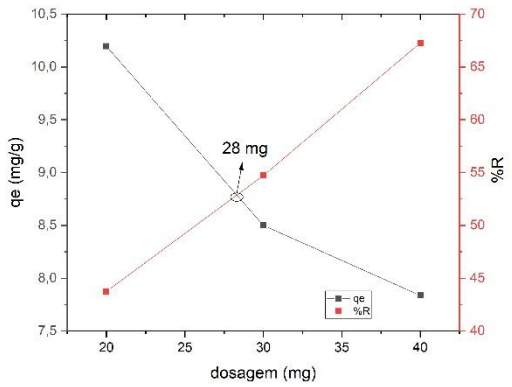


Figura 4. Ensaio de massa para material impregnado com nanopartículas de ferro (MO-Fe/S.V).

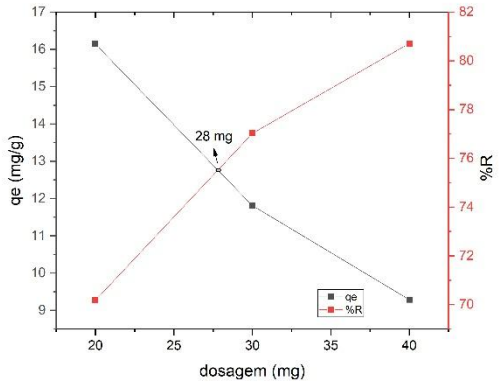


Figura 5. Ensaio de massa para material sintetizado em reator hidrotermal (h-MO).

Influência do pH.

A influência do pH foi avaliada nos valores 4, 7 e 10, utilizando-se a dosagem ótima previamente determinada de 28 mg para ambos os adsorventes. A solução padrão de sertralina, na forma de cloridrato de sertralina, apresentou pH natural ácido (≈4), sendo utilizado NaOH para ajuste aos demais valores de pH, o resultado pode ser observado na figura 6 para ambos os materiais.

Para o material MO-Fe/S.V observou-se aumento expressivo da capacidade adsortiva com a elevação do pH, passando de 9,5 mg g^{-1} em pH 4 para 14,2 mg g^{-1} em pH 10. Já para o hidrochar (h-MO), o melhor desempenho foi obtido em pH 7, com capacidade adsortiva de 14,6 mg g^{-1}, enquanto o menor resultado também foi observado em pH 4, correspondendo a 12,5 mg g^{-1}. De modo geral, o h-MO apresentou melhores resultados na maioria das condições avaliadas, com exceção do pH 10, em que o material impregnado com nanopartículas apresentou maior eficiência.

Esse comportamento pode ser relacionado às características de ionização da sertralina e às cargas superficiais dos adsorventes. A sertralina apresenta pKa de 9,16, de modo que, em pH inferiores ao pKa, o composto encontra-se predominantemente protonado, favorecendo interações eletrostáticas entre adsorvente e adsorvato. Biomassas lignocelulósicas, como a casca da moringa, apresentam naturalmente predominância de cargas negativas em função da presença de grupos funcionais oxigenados, principalmente associados à lignina e hemicelulose.

Além disso, estudos de potencial zeta realizados por Cusioli et al. (2020) para moringa impregnada com nanopartículas metálicas demonstraram predominância de carga superficial negativa em valores de pH superiores a 3, indicando que a impregnação metálica não elimina as características aniônicas do material, mas pode intensificar a densidade de cargas superficiais e favorecer interações eletrostáticas em meio alcalino. Assim, o aumento da adsorção em pH mais elevados, especialmente para o MO-Fe/S.V, sugere contribuição conjunta de interações eletrostáticas e possíveis interações superficiais adicionais promovidas pelas nanopartículas metálicas. Porém, apesar de piores resultados encontrados em pH natural esse valor apresenta um ponto positivo, já que não necessita de nenhum reagente para ajustá-lo, logo, apesar do resultado inferior, os próximos ensaios foram mantidos em pH 4, a fim de limitar o uso de reagentes e diminuir custos adicionais.

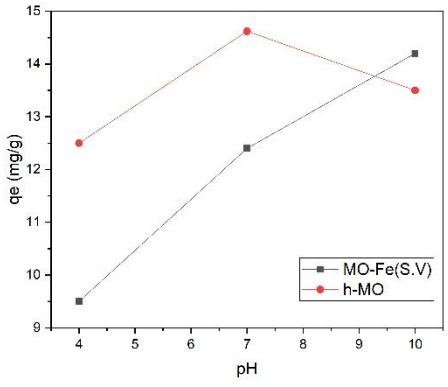


Figura 6. Ensaio de pH para ambos os materiais (h-MO e MO-Fe/S.V).

Cinética de adsorção.

Os ensaios cinéticos foram realizados utilizando solução de sertralina a 20 mg L^{-1}, mantendo-se as

condições previamente otimizadas. Alíquotas foram coletadas em intervalos pré-determinados até a formação do equilíbrio cinético, definido como o instante em que não houve variação significativa da concentração residual, indicando equivalência entre as taxas de adsorção e dessorção.

Para o material MO-Fe/S.V (Figura 7), observou-se aumento expressivo da capacidade adsortiva nos instantes iniciais, seguido de aumento gradual ao longo do tempo. A partir de aproximadamente 400 min ocorreu redução na taxa de adsorção, enquanto em torno de 800 min foi observado o estabelecimento de um platô, indicando a formação do equilíbrio cinético. Os modelos cinéticos ajustados encontram-se apresentados na Tabela 1. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram de 0,60 para pseudo-primeira ordem (PFO), 0,84 para pseudo-segunda ordem (PSO) e 0,96 para Elovich. Além disso, o modelo PFO apresentou maior desvio entre a capacidade adsortiva experimental e calculada. Dessa forma, os dados experimentais apresentaram melhor ajuste ao modelo de Elovich, sugerindo predominância de quimissorção no processo. Esse comportamento também explica a adsorção relativamente lenta observada, uma vez que mecanismos químicos demandam maior energia de ativação e dependem da difusão do adsorvato até os sítios ativos internos do material. Assim, a impregnação metálica pode ter favorecido a difusão intrapartícula e a interação química entre adsorvente e adsorvato.

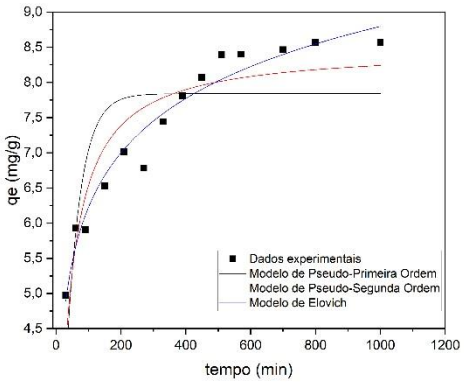


Figura 7. Cinética para MO-Fe (S.V).

Tabela 1. Dados ajustados aos modelos cinéticos para MO-Fe (S.V).

Modelo	Parâmetros do ajuste	$q_{e,exp}$ (mg g^{-1})	$q_{e,cal}$ (mg g^{-1})	R^2
PFO	k_1 = 0,023	8,50	7,84	0,60
PSO	k_2 = 0,004	8,50	8,48	0,84
Elovich	α = 2,90 e β = 0,894	8,50	-	0,96

Para o hidrochar, h-MO, o perfil cinético descrito na figura 8 apresentou comportamento semelhante, com aumento inicial moderado e formação do equilíbrio em aproximadamente 800 min. Os valores de R^2 foram de 0,88 para PFO, 0,89 para PSO e 0,90 para Elovich, indicando ajuste satisfatório para todos os modelos. Entretanto, a Tabela 2 demonstra que o modelo PSO apresentou maior erro percentual entre os valores experimental e teórico. Nesse caso, os resultados sugerem contribuição significativa de mecanismos de fissorção, especialmente nos instantes iniciais da adsorção. Esse comportamento pode estar associado à elevada área superficial e à boa distribuição de poros obtidas no processo hidrotermal, características que favorecem interações físicas e rápida ocupação superficial dos sítios ativos. Além disso, os baixos valores dos parâmetros do ajuste descritos na tabela 1 e 2 demonstram que ambos os mecanismos são lentos. Essas descobertas estão de acordo com a literatura, como nos trabalhos de Raji et al. (2023) e Zulaicha et al. (2026), que ao avaliar a *Moringa oleífera* para remoção de corante violeta observaram que a cinética se ajustou ao modelo de pseudo-segunda ordem (PSO), descrevendo um mecanismo predominantemente químico.

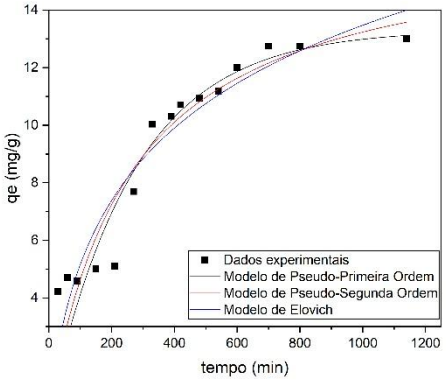


Figura 8. Cinética para h-MO.

Tabela 2. Dados ajustados aos modelos cinéticos para h-MO.

Modelo	Parâmetros do ajuste	$q_{e,exp}$ (mg g^{-1})	$q_{e,cal}$ (mg g^{-1})	R^2
PFO	k_1 = 0,004	13,0	13,31	0,88
PSO	k_2 = 0,002	13,0	16,69	0,89

Elovich	$\alpha = 0{,}10$ e $\beta = 0{,}24$	13,0	-	0,90

Comparação entre os materiais.

A Tabela 3 apresenta um resumo comparativo dos principais parâmetros obtidos para os adsorventes MO-Fe/S.V e h-MO na remoção de sertralina.

Tabela 3. Comparativo entre os materiais e suas sínteses.

Parâmetro	MO-Fe/S.V	h-MO
Dosagem ótima (mg)	28	28
Melhor pH	10	4
q_e em pH ótimo (mg g^{-1})	14,2	14,6
q_e em pH natural (mg g^{-1})	9,5	12,5
Tempo de equilíbrio (min)	800	800
Melhor modelo cinético	Elovich	PSO/Elovich
Mecanismo predominante	Quimissorsão	Equilibrado
Necessidade de modificação metálica	Sim	Não
Etapa hidrotérmica	Não	Sim
Demanda energética de síntese	Não	Sim
Custo Operacional Estimado	Menor	Maior

Os resultados demonstram que ambos os materiais apresentaram elevada eficiência na remoção de sertralina, porém com comportamentos distintos em relação ao mecanismo adsortivo e às condições operacionais. O material MO-Fe/S.V apresentou melhor desempenho em meio alcalino, indicando maior influência das interações químicas promovidas pela impregnação metálica. Esse comportamento também foi evidenciado pelo melhor ajuste ao modelo de Elovich, característico de processos controlados por quimissorção.

Por outro lado, o h-MO apresentou maiores capacidades adsortivas na maioria das condições avaliadas, especialmente em pH neutro, o que representa um cenário sem uso de reagentes adicionais, além de melhor ajuste simultâneo aos modelos PFO e Elovich. Esse resultado sugere preliminarmente uma maior contribuição de mecanismos físicos.

Apesar do melhor desempenho adsortivo do h-MO, sua rota de síntese apresenta maior demanda energética devido à necessidade de aquecimento em reator hidrotérmico sob temperatura e pressão controladas. Esse fator aumenta a complexidade operacional e os custos associados à produção do material. Em contrapartida, o MO-Fe/S.V apresenta rota sintética mais simples e energeticamente mais viável, embora dependa da etapa adicional de impregnação metálica. Dessa forma, a escolha do adsorvente depende não apenas da eficiência de remoção, mas também de fatores tecnológicos, energéticos e econômicos relacionados à aplicação em escala.

CONCLUSÃO

O aumento da pressão sobre os recursos hídricos decorrente do crescimento populacional e industrial intensifica a necessidade de técnicas avançadas para remediação de contaminantes emergentes, como a sertralina, amplamente detectada em ambientes aquáticos devido ao elevado consumo farmacêutico. Nesse contexto, a adsorção destaca-se como uma técnica eficiente, sustentável e operacionalmente vantajosa, especialmente quando associada ao uso de biossorventes, como a moringa oleifera, biomassa amplamente estudada para aplicações ambientais.

Os resultados demonstraram que a biomassa pode ser empregada em diferentes rotas de síntese, originando materiais com características físico-químicas distintas, diferentes densidades de carga e comportamentos adsortivos específicos. Foram obtidas capacidades adsortivas de 9,5 mg g^{-1} para o MO-Fe/S.V e 12,5 mg g^{-1} para o h-MO em pH natural, evidenciando o potencial tecnológico desses materiais na remediação de contaminantes emergentes. Estudos futuros envolvendo análises de mecanismos difusionais complementares, como as isotermas de adsorção, e aplicações em sistemas reais e contínuos poderão ampliar a compreensão do processo e avaliar a viabilidade de aplicação em escala industrial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Maringá (UEM) pela disponibilização da infraestrutura e suporte para desenvolvimento deste trabalho, bem como ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UEM (PEQ-UEM) pela formação e apoio acadêmico. À professora doutora Angélica Marquetotti Salcedo Vieira pela orientação e acompanhamento científico ao longo da pesquisa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro e técnico concedido. Aos integrantes do Laboratório de Gestão, Controle e Poluição Ambiental (LGCPA) pelos conhecimentos compartilhados e apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

AGBASI, J. C. *et al.* Contaminants of emerging concern in Nigerian bottled water: A critical review of occurrence, analytical foundations, and regulatory implications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 14, n. 3, p. 123075, 1 jun. 2026.

BELLO, M. M.; ABDUL RAMAN, A. A.; PURUSHOTHAMAN, M. Applications of fluidized bed reactors in wastewater treatment – A review of the major design and operational parameters. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 1492–1514, 10 jan. 2017.

BELTRAN, L. B. *et al.* Zeolite functionalized with metal ions: A dual strategy for water purification − removal of sertraline hydrochloride and pathogenic bacteria. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 23, p. 101060, 1 jun. 2025.

CHAWLA, H.; SINGH, S. K.; HARITASH, A. K. Reversing the damage: ecological restoration of polluted water bodies affected by pollutants due to anthropogenic activities. **Environmental science and pollution research international**, v. 31, n. 1, p. 127–143, 1 jan. 2024.

CUSIOLI, L. F. *et al.* Development of a new low-cost adsorbent functionalized with iron nanoparticles for removal of metformin from contaminated water. **Chemosphere**, v. 247, p. 125852, 1 maio 2020.

DÍAZ-MONTAÑA, E. J. *et al.* Occurrence and distribution of emerging contaminants in surface water and biota: An integrated analytical-statistical assessment. **Environmental Pollution**, v. 400, p. 128251, 1 jul. 2026.

HO, T. H.; TRINH, T. T. Molecular mechanisms of methylene blue removal by hydrochar: Insights for sustainable water treatment design. **Journal of Molecular Liquids**, v. 447, p. 129353, 1 abr. 2026.

LAIMOU-GERANIOU, M. *et al.* Psychoactive pharmaceuticals: Consumption trends, removal during wastewater treatment and occurrence in receiving waters with associated environmental risks. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 19, p. 100816, 1 ago. 2025.

LUMOR, L. *et al.* Gender and organ responsiveness in Dreissena polymorpha exposed to the antidepressant sertraline: from uptake to effects. **Environmental Research**, v. 289, p. 123422, 15 jan. 2026.

RAJI, Y. *et al.* High adsorption capacities of crystal violet dye by low-cost activated carbon prepared from Moroccan Moringa oleifera wastes: Characterization, adsorption and mechanism study. **Diamond and Related Materials**, v. 135, p. 109834, 1 maio 2023.

RECK, I. M. *et al.* CAPACIDADE ADSORTIVA DAS SEMENTES DE MORINGA OLEIFERA LAM PARA REMOÇÃO DO CORANTE AMARELO TARTRAZINA EM LEITO FIXO: INFLUÊNCIA DA ALTURA DE LEITO, pH E REUSO DO BIOSSORVENTE. **Encontro Internacional de Produção Científica,** 2019.

RODRÍGUEZ, R. *et al.* Key emerging contaminants and their implications for water quality: A critical review of occurrence, regulation, and treatment performance. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 14, n. 3, p. 122966, 1 jun. 2026.

WANG, XINYU *et al.* Advanced engineered materials for emerging contaminant remediation toward water treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 540, p. 177481, 15 jul. 2026.

ZULAICHA, A. S. *et al.* Bio-assisted synthesis of Fe_3O_4NPs@C nanocomposite using Moringa oleifera leaf extract for adsorption of crystal violet. **Results in Chemistry**, p. 103474, 22 maio 2026.