

APLICAÇÃO DE MODELOS CINÉTICOS NA ADSORÇÃO DE CROMO UTILIZANDO CARVÃO PRODUZIDO A PARTIR DE RESÍDUOS DE ABACATE

E. M. Silva¹, F. A. Gonçalves², D. P. Soria³, C.F.R.P. Paschoalato⁴, M. V. Agnesini⁵

¹*Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, Brasil (evanuzia.silva@sou.unaerp.edu.br)*

²*Curso de Engenharia Química, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, Brasil (felipe.goncalves@sou.unaerp.edu.br)*

³*Curso de Engenharia Química, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, Brasil (diogo.soria@sou.unaerp.edu.br)*

⁴*Curso de Engenharia Química e Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, Brasil (cpaschoalato@unaerp.br)*

⁵*Curso de Engenharia Química e Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, Brasil (magnesini@unaerp.br)*

A contaminação de águas por metais pesados demanda tecnologias eficientes de tratamento. Neste trabalho, avaliou-se a adsorção de cromo utilizando carvão ativado produzido a partir de resíduos de abacate por ativação física. Ensaios cinéticos foram realizados em três concentrações iniciais (1, 2 e 5 mg L⁻¹), sendo os dados ajustados aos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. O modelo de pseudo-segunda ordem apresentou os melhores ajustes para todas as condições avaliadas.

Palavras-chave: adsorção; cromo; carvão ativado; resíduos de abacate; cinética de adsorção.

INTRODUÇÃO

A crescente contaminação de recursos hídricos por metais pesados representa um dos desafios mais relevantes da engenharia ambiental contemporânea. Diferentemente dos poluentes orgânicos, esses elementos não são biodegradáveis, tendendo a se acumular nos ecossistemas aquáticos e a se potencializar ao longo da cadeia alimentar (Bullo e Bayisa, 2022). Entre os metais de maior preocupação ambiental e sanitária, o cromo se destaca por ocorrer predominantemente em duas formas: Cr(III), essencial em baixas concentrações, e Cr(VI), altamente tóxico, carcinogênico e mutagênico, frequentemente associado a efluentes industriais de galvanoplastia, curtumes e metalurgia (Gavino et al., 2025; Santos, 2022).

Para o tratamento de efluentes contendo metais pesados, a adsorção tem se consolidado como uma das técnicas mais eficientes e economicamente viáveis, em função de sua simplicidade operacional, elevada eficiência de remoção e possibilidade de uso de materiais de baixo custo como adsorventes (Karnib et al., 2014). Nesse contexto, o carvão ativado é

amplamente reconhecido como adsorvente de referência, em razão de sua elevada área superficial, estrutura microporosa bem desenvolvida e versatilidade frente a distintos contaminantes (Mishra et al., 2024). Contudo, os elevados custos associados à produção convencional desse material têm impulsionado a busca por precursores alternativos, especialmente biomassas lignocelulósicas de origem agroindustrial, que oferecem vantagens como baixo custo, ampla disponibilidade e caráter renovável (Mishra et al., 2024).

Nesse cenário, os resíduos de abacate (casca e semente) emergem como matéria-prima promissora para a produção de carvão ativado. O Brasil figura entre os dez maiores produtores mundiais da fruta, com colheita superior a 427 mil toneladas em 2024 (IBGE, 2024), gerando volumes expressivos de resíduos no processamento industrial. A semente representa entre 15 e 20% da massa do fruto, e a casca entre 10 e 15%, ambas ricas em polissacarídeos e compostos fenólicos, o que confere ao material potencial para a obtenção de precursores carbonáceos com boas propriedades adsorptivas (Da Silva, 2020;

Tesfaye et al., 2022). Estudos recentes confirmam a viabilidade da conversão desses resíduos em carvão com elevada área superficial e desempenho satisfatório na remoção de contaminantes (Leite et al., 2018).

A produção do carvão ativado a partir de biomassa envolve etapas de pirólise e ativação, sendo que o método de ativação influencia diretamente a estrutura porosa e a capacidade adsorptiva do material (Mishra et al., 2024). A compreensão da cinética de adsorção é fundamental para avaliar a velocidade e o mecanismo de remoção do adsorbato, sendo os modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem os mais empregados para esse fim (Nascimento et al., 2014).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a adsorção de Cr em carvão ativado produzido a partir de resíduos de abacate por ativação física, aplicando modelos cinéticos em três concentrações iniciais distintas, visando compreender o mecanismo e a velocidade do processo de remoção.

MATERIAL E MÉTODOS

Preparo da biomassa e produção do carvão ativado

Os resíduos de casca e semente de abacate foram lavados, secos em estufa a 60 °C até massa constante e submetidos à redução de tamanho. A pirólise foi realizada em reator tubular de leito fixo a 650 °C, por 30 min, com taxa de aquecimento de 25 °C min⁻¹. A ativação física foi conduzida com vapor de água a 790 °C por 60 min.

Ensaios cinéticos de adsorção

Os ensaios cinéticos foram conduzidos em sistema de batelada, utilizando 5 g de carvão ativado em 1 L de solução de cromo total, preparada a partir de reagente de grau analítico (PA), nas concentrações iniciais de 1, 2 e 5 mg L⁻¹. As concentrações iniciais foram definidas com base em valores compatíveis com efluentes diluídos contendo cromo e em concentrações frequentemente empregadas em estudos de adsorção de metais em meio aquoso.

O pH foi ajustado para 4,0, condição previamente determinada como ótima em ensaios preliminares. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

As amostras foram coletadas nos tempos de 1, 2, 3, 4 e 5 minutos, seguidas de coletas a cada 5 minutos até 30 minutos, e uma coleta final aos 60 minutos. As concentrações de cromo foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica (EAA).

Modelagem cinética

Os dados experimentais obtidos nos ensaios de adsorção de cromo foram avaliados por meio de modelos cinéticos amplamente empregados na literatura, com o objetivo de descrever a velocidade do

processo de adsorção e identificar os possíveis mecanismos envolvidos na transferência de massa. Para isso, foram aplicados os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

A capacidade adsorptiva em cada instante de tempo (q_t) foi calculada a partir da Equação 1:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (1)$$

em que C_0 e C_e correspondem às concentrações inicial e de equilíbrio (mg L⁻¹), V ao volume da solução (L) e m à massa do adsorvente (g).

Para o cálculo da eficiência de remoção de Cromo, utilizou-se a Equação 2:

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100 \quad (2)$$

O modelo cinético de pseudo-primeira ordem foi aplicado conforme a Equação 3:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

onde q_e e q_t representam as capacidades de adsorção no equilíbrio e no tempo (t), respectivamente (mg g⁻¹), e k_1 é a constante cinética de pseudo-primeira ordem (min⁻¹).

O modelo de pseudo-segunda ordem foi avaliado utilizando a forma linearizada apresentada na Equação 4:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

onde k_2 corresponde à constante cinética de pseudo-segunda ordem (g mg⁻¹ min⁻¹).

Os parâmetros cinéticos dos modelos foram obtidos por regressão linear dos dados experimentais. A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), sendo considerado mais adequado o modelo que apresentou maior valor de R^2 e melhor concordância entre os valores experimentais e calculados da capacidade de adsorção no equilíbrio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O carvão ativado produzido apresentou capacidade de adsorção de azul de metileno de 49,4 mg g⁻¹, indicando o desenvolvimento de estrutura porosa compatível com aplicações em adsorção de contaminantes em fase aquosa.

Cinética de adsorção de cromo

A Figura 1 apresenta a eficiência de remoção de cromo ao longo do tempo para as concentrações iniciais de 1, 2 e 5 mg L⁻¹. Observa-se que a adsorção ocorreu de forma rápida nos primeiros minutos de contato, seguida por uma redução gradual da taxa de remoção

até o estabelecimento do equilíbrio. As eficiências de remoção atingiram 100%, 80% e 52% para as concentrações de 1, 2 e 5 mg L⁻¹, respectivamente, ao final de 30 minutos.

Esse comportamento é característico de processos adsorptivos e está associado à elevada disponibilidade inicial de sítios ativos na superfície do adsorvente. À medida que esses sítios são ocupados, ocorre a diminuição da força motriz para transferência de massa, reduzindo a velocidade de adsorção.

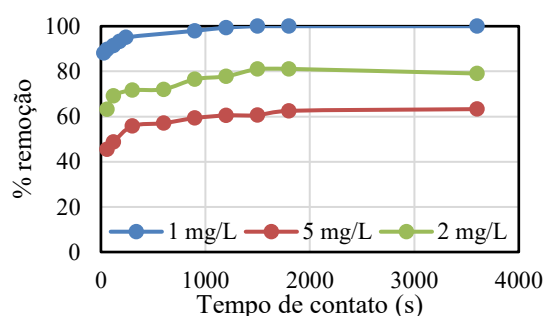


Figura 1. Eficiência de remoção de cromo em função do tempo para diferentes concentrações iniciais.

Em todas as condições avaliadas, observou-se a tendência de estabilização da remoção após aproximadamente 20 minutos, indicando a aproximação do equilíbrio de adsorção.

A Figura 2 apresenta a variação da capacidade adsorptiva ao longo do tempo para as diferentes concentrações iniciais estudadas.

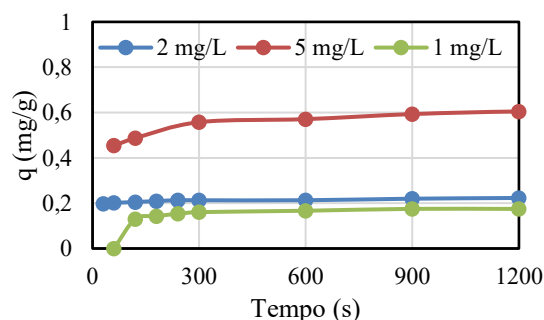


Figura 2. Capacidade adsorptiva em função do tempo para diferentes concentrações iniciais.

Observa-se que os valores de q_t aumentaram rapidamente nos instantes iniciais do processo, corroborando o comportamento observado para a eficiência de remoção. Esse aumento está relacionado à elevada disponibilidade de sítios ativos e ao maior gradiente de concentração existente no início do experimento. As maiores concentrações iniciais resultaram em maiores capacidades adsorptivas de equilíbrio, uma vez que a maior quantidade de íons metálicos disponíveis em solução aumenta a

probabilidade de interação com os sítios ativos presentes na superfície do carvão ativado.

Após o período inicial de rápida adsorção, os valores de q_t apresentaram tendência de estabilização, indicando a saturação progressiva dos sítios disponíveis e a aproximação do equilíbrio do sistema.

Os resultados obtidos demonstram que a adsorção de cromo pelo carvão ativado produzido a partir de resíduos de abacate ocorreu de forma rápida, especialmente nos primeiros minutos de contato, sendo influenciada pela concentração inicial do contaminante. Com o objetivo de descrever quantitativamente esse comportamento e identificar os mecanismos envolvidos no processo, os dados experimentais foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Ajuste dos modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem

Os dados experimentais obtidos nos ensaios de adsorção foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO), com o objetivo de descrever a velocidade de adsorção e avaliar os mecanismos envolvidos no processo de remoção do cromo. As Figuras 3 e 4 apresentam as linearizações dos modelos para as diferentes concentrações iniciais avaliadas, enquanto os parâmetros cinéticos calculados encontram-se na Tabela 1.

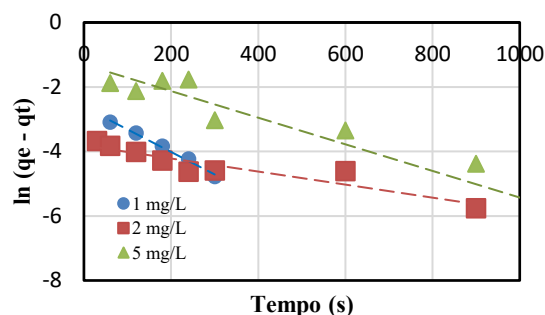


Figura 3. Linearização do modelo de pseudo-primeira ordem.

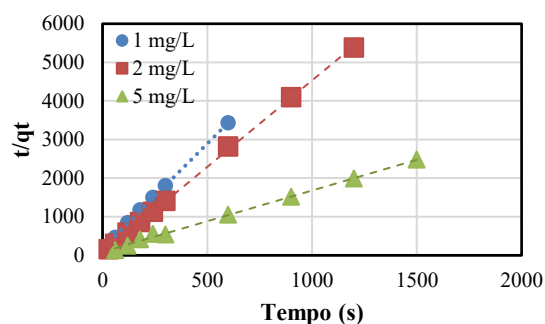


Figura 4. Linearização do modelo de pseudo-segunda ordem.

Os parâmetros cinéticos obtidos pelos modelos de pseudo-primeira ordem (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO) são apresentados na Tabela 1. Observa-se que o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou os melhores ajustes para todas as concentrações avaliadas, com coeficientes de determinação variando entre 0,9978 e 0,9996. Para o modelo de pseudo-primeira ordem, os valores de R^2 variaram entre 0,8670 e 0,9928, indicando menor capacidade de

representar o comportamento experimental do sistema.

O melhor desempenho do modelo de pseudo-segunda ordem sugere que o processo de adsorção é influenciado pela ocupação dos sítios ativos disponíveis na superfície do adsorvente, bem como pelas interações entre os íons de cromo e os grupos funcionais presentes no carvão ativado.

Tabela 1. Parâmetros cinéticos obtidos pelos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para a adsorção de cromo em carvão ativado produzido a partir de resíduos de abacate.

C_0 (mg/L)	Modelo	k	$q_{e \text{ calc}}$ (mg/g)	$q_{e \text{ exp}}$ (mg/g)	R^2
1	Pseudo-primeira ordem	0,007	0,073	0,175	0,9928
1	Pseudo-segunda ordem	0,171	0,184	0,175	0,9996
2	Pseudo-primeira ordem	0,002	0,022	0,223	0,8670
2	Pseudo-segunda ordem	0,403	0,223	0,223	0,9996
5	Pseudo-primeira ordem	0,004	0,272	0,606	0,9184
5	Pseudo-segunda ordem	0,029	0,628	0,606	0,9978

Para o modelo de pseudo-segunda ordem, os valores de capacidade adsorptiva calculados no equilíbrio ($q_{e \text{ calc}}$) apresentaram boa concordância com os valores experimentais ($q_{e \text{ exp}}$) em todas as concentrações avaliadas. Para as concentrações de 1 e 2 mg L⁻¹, a proximidade entre os valores calculados e experimentais foi praticamente integral, enquanto para a concentração de 5 mg L⁻¹ observou-se uma discrepância de aproximadamente 3,6%, ainda assim considerada satisfatória. Essa pequena divergência, aliada ao elevado coeficiente de determinação obtido ($R^2 = 0,9978$), confirma a adequação do modelo para descrever o comportamento cinético do sistema nas condições estudadas.

O comportamento cinético observado neste estudo difere do relatado por Hammad et al. (2025), que avaliaram a adsorção de Cr(VI) em carvão ativado derivado de folhas de palmeira tratadas com H₃PO₄ (PFTACs) e verificaram melhor ajuste ao modelo de pseudo-primeira ordem ($R^2 = 0,9931$), sugerindo predominância de adsorção física com sítios homogêneos. Em contraste, no presente trabalho o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou ajuste superior em todas as concentrações avaliadas (R^2 entre 0,9978 e 0,9996), indicando que a adsorção de cromo pelo carvão de resíduos de abacate é governada pela disponibilidade e ocupação dos sítios ativos, com componente de quimissorção mais relevante. Essa diferença pode estar associada à natureza distinta dos precursores, aos métodos de ativação empregados, química com H₃PO₄ versus física com vapor de água,

e às diferentes concentrações iniciais avaliadas, uma vez que Hammad et al. (2025) trabalharam com $C_0 = 50$ mg L⁻¹, enquanto o presente estudo utilizou concentrações de 1 a 5 mg L⁻¹, condições mais representativas de águas contaminadas do que de efluentes industriais concentrados.

De forma similar, estudo com carvão ativado produzido a partir de resíduo de repolho reportou remoção de 99,87% de Cr(VI) em pH 3 e tempo de equilíbrio de 150 minutos (Berhane et al., 2025). No presente trabalho, o equilíbrio foi atingido em aproximadamente 20 minutos, indicando cinética de adsorção significativamente mais rápida, o que pode ser atribuído à elevada dosagem de adsorvente empregada (5 g L⁻¹) e às baixas concentrações iniciais avaliadas.

CONCLUSÃO

O carvão ativado produzido a partir de resíduos de abacate apresentou potencial para remoção de cromo em solução aquosa, alcançando elevadas eficiências de remoção nas condições estudadas.

Os ensaios cinéticos demonstraram que o processo de adsorção ocorreu de forma rápida, com estabilização próxima ao equilíbrio após aproximadamente 20 minutos de contato. Observou-se ainda que o aumento da concentração inicial promoveu o aumento da capacidade adsorptiva do material.

A modelagem cinética indicou que o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de

determinação superiores a 0,99 e valores calculados de capacidade de adsorção próximos aos obtidos experimentalmente. Esses resultados sugerem que a adsorção é influenciada pela disponibilidade de sítios ativos na superfície do adsorvente.

Os resultados reforçam a viabilidade do aproveitamento de resíduos agroindustriais de abacate na produção de adsorventes de baixo custo, com potencial aplicação no tratamento de águas e efluentes contendo cromo em baixas concentrações, cenário relevante tanto para o abastecimento público quanto para o controle de efluentes industriais diluídos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de pesquisa e à Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP) pelo apoio institucional, infraestrutura laboratorial e suporte técnico necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BERHANE, E.; NEGASSA, B.; AYANSA, K.T.; DADI, D.; FEKADU, S. Cabbage waste derived activated carbon for removing hexavalent chromium from synthetic and tannery wastewater. *BMC Chemistry* 19, 105 (2025). <https://doi.org/10.1186/s13065-025-01479-1>

BULLO, T. A.; BAYISA, Y. M. Optimizing the removal efficiency of chromium from tanning plant effluent by adsorption method with activated carbon chat stems (*Catha edulis*) using response surface methodology. *Water Conservation & Management*, v. 6, n. 1, p. 15-21, 2022. DOI: 10.26480/wcm.01.2022.15.21.

GAVINO, N. F.; REYES, G. B.; BELLO, J.R.; ROSA, E. C. S.; LIZAMA, M. A. P.; GONÇALVES, J. E. Avaliação da contaminação por metais e metaloides em águas superficiais do rio Pirapó, Estado do Paraná (PR), Brasil, e seus riscos ambientais e à saúde humana. *Research, Society and Development*, v. 14, n. 12, e151141250409, 2025. DOI: 10.33448/rsd-v14i12.50409.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção de abacate. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/abacate/br>. Acesso em: 13 jun. 2026.

Hammad, W.A.; Hawash, S.A.; Abdel-latif, M.S.; Kuku, M.; Amr, M. H. A. High efficiency adsorption of hexavalent chromium using bioderived activated carbon kinetics, isotherms, and thermodynamics. *Sci Rep* 15, 25871 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08472-7>

KARNIB, M.; KABBANI, A.; HOLAIL, H.; OLAMA, Z. Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite. *Energy Procedia*, v. 50, p. 113-120, 2014. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.06.014.

LEITE, A. B.; SAUCIER, C.; LIMA, E. C.; REIS, G. S.; UMPIERRES, C. S.; MELLO, B. L.; SHIRMARDI, M.; DIAS, S. L. P.; SAMPAIO, C. H. Activated carbons from

avocado seed: optimisation and application for removal of several emerging organic compounds. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, p. 7647-7661, 2018. DOI: 10.1007/s11356-017-1105-9.

MISHRA, R. K.; SINGH, B.; ACHARYA, B. A comprehensive review on activated carbon from pyrolysis of lignocellulosic biomass: an application for energy and the environment. *Carbon Resources Conversion*, v. 7, p. 100228, 2024. DOI: 10.1016/j.crccon.2024.100228.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. E-book. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 13/06/2026

SANTOS, J.C. M. Tecnologias de conversão térmica para aproveitamento de resíduos polímeros: modelagem e simulação. 2022. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022.

SILVA, G. G. Potencial antioxidante, neuroprotetor e antiacetilcolinesterásico da casca e caroço de *Persea americana*. 2020. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Ciências de Alimentos, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

TESFAYE, T.; AYELE, M.; GIBRIL, M.; FEREDÉ, E.; LIMENEH, D. Y.; KONG, F. Beneficiation of avocado processing industry by-product: a review on future prospect. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, v. 5, p. 100253, 2022. DOI: 10.1016/j.crgsc.2021.100253.