

RESSALVA

**Atendendo solicitação da autora,
o texto completo deste
documento será disponibilizado
somente a partir de 06/03/2027.**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – IBILCE, Campus de São
José do Rio Preto

Gabriela Aparecida Nogueira

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ADSORTIVAS DE CARVÕES MAGNÉTICOS
ATIVADOS TERMOQUIMICAMENTE COM KOH PARA REMOÇÃO
SIMULTÂNEA DE Pb, Cd e Ni**

São José do Rio Preto
2025

Gabriela Aparecida Nogueira

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ADSORTIVAS DE CARVÕES MAGNÉTICOS
ATIVADOS TERMOQUIMICAMENTE COM KOH PARA REMOÇÃO
SIMULTÂNEA DE Pb, Cd e Ni**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (IBILCE), Campus de São José do Rio Preto, para obtenção do título de Mestre em Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Márcia Cristina Bisinoti
Coorientador: Prof. Dr. Odair Pastor Ferreira

São José do Rio Preto
2025

N778e

Nogueira, Gabriela Aparecida

Estudo das Propriedades Adsorptivas de Carvões Magnéticos Ativados
Termoquimicamente com KOH para Remoção Simultânea de Pb, Cd e Ni / Gabriela
Aparecida Nogueira. -- São José do Rio Preto, 2025

135 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de
Bióciências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientadora: Márcia Cristina Bisinoti

Coorientador: Odair Pastor Ferreira

1. Biomassa. 2. Carvão magnético. 3. Ativação termoquímica. 4. Sustentabilidade. 5.
Metais tóxicos. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar na síntese de carvão magnético contribui para a bioeconomia circular e sustentabilidade, atingindo o Objetivo para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12 (consumo e produção responsáveis). Além disso, o uso dos materiais obtidos na adsorção de poluentes tóxicos, tais como chumbo, cádmio e níquel, colabora para alcançar o ODS 06 (água limpa e saneamento).

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The utilization of sugarcane bagasse in the synthesis of magnetic carbon contributes to circular bioeconomy and sustainability, addressing Sustainable Development Goal (SDG) 12 (responsible consumption and production). Additionally, the use of the derived materials in the adsorption of toxic pollutants, such as lead, cadmium, and nickel, contributes to achieving SDG 06 (clean water and sanitation).

Gabriela Aparecida Nogueira

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES ADSORTIVAS DE CARVÕES MAGNÉTICOS
ATIVADOS TERMOQUIMICAMENTE COM KOH PARA REMOÇÃO
SIMULTÂNEA DE Pb, Cd e Ni**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (IBILCE), Campus de São José do Rio Preto, para obtenção do título de Mestre em Química.

Data da defesa: 06/03/2025.

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Márcia Cristina Bisinoti
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto - SP
Orientadora

Prof. Dr. Ronaldo Ferreira do Nascimento
UFC – Fortaleza - CE

Prof. Dr. Vitor de Cinque Almeida
UEM – Maringá - PR

Dedico este trabalho às pessoas que me ensinaram que o verdadeiro amor, respeito e apoio são as maiores ferramentas para o sucesso: meus pais, Tatiani e Julio, meu irmão Felipe e meu amado Lucas. Este trabalho é uma homenagem ao vínculo indissolúvel que compartilhamos e à força que ele me proporciona.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a Dr^a Márcia Cristina Bisinoti, por sua orientação, incentivo e confiança ao longo da minha jornada acadêmica.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Odair Pastor Ferreira, pelas valiosas conversas, apoio e sugestões durante a elaboração deste trabalho.

À FAPESP, pelo apoio financeiro, concedido por meio dos Processos nº 2021/09126-3 e 2021/12214-1, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 – processo de bolsa nº processo nº 88887.843931/2023-00.

Ao Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (IBILCE), pelo suporte e pela estrutura proporcionada desde o início da minha trajetória acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Química (PPG Química) e aos docentes do Departamento de Química e Ciências Ambientais (DQCA), por todo suporte e ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Altair Benedito Moreira, pela atenção e pelo auxílio em diversos momentos, principalmente na manutenção dos equipamentos que foram essenciais para a execução deste trabalho.

Aos técnicos Claudinei e Daniela, pela assistência e apoio, principalmente nas práticas da disciplina de Química Ambiental II, a qual estagiei sob orientação da Prof^a Dr^a Márcia Cristina Bisinoti por meio do Programa de Aperfeiçoamento e Apoio à Docência no Ensino Superior (PAADES).

Ao Laboratório de Química Analítica e Sucroquímica e ao Prof. Dr. Maurício Boscolo, pela disponibilização dos equipamentos necessários para as análises de Difração de Raios-X (DRX), Termogravimetria (TGA) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

Aos colegas do Laboratório de Estudos em Ciências Ambientais (LECA), em especial a minha amiga Suelen, com quem compartilhei diversas conversas e momentos, tornando-se uma grande amiga. Também expressei meu reconhecimento às minhas coorientadas de Iniciação Científica Lorena e Tais pelo comprometimento demonstrado em seus trabalhos. Sinto-me orgulhosa e feliz por saber que puderam absorver conhecimentos sob minha supervisão.

Aos meus pais, Tatiani e Julio, pelo amor incondicional e pelo apoio incansável que proporcionaram ao longo de toda a minha vida. São vocês os verdadeiros pilares de força e fé

que me ajudaram a nunca desistir. Essa conquista é nossa, e é com imenso carinho que compartilho esse triunfo com vocês.

Ao meu querido irmão Felipe, por sua presença constante, pelo companheirismo em todos os momentos, pelo imensurável amor que sinto por ser sua irmã mais velha.

Ao meu amado Lucas, por seu amor, apoio, incentivo e cumplicidade, que foram essenciais para superar os desafios desta jornada acadêmica. Sou muito feliz por tê-lo ao meu lado, pois sei que posso contar com seu apoio em todos os caminhos que eu optar por trilhar.

A toda a minha família, em especial aos meus avós Maria e Devair, que sempre estiveram ao meu lado com seu amor e suporte incondicionais. O apoio de vocês foi fundamental, especialmente durante este período.

A todos os meus amigos, cuja presença e apoio foram imprescindíveis ao longo desta jornada, meu sincero agradecimento. Um agradecimento especial aos amigos Márcio, Nathália, Sabrina e Alessandro, e ao meu afilhado Lucca, cuja alegria e companhia trouxeram luz aos momentos mais desafiadores.

“Foi o tempo que dedicastes à tua rosa
que a fez tão importante” – Antoine de
Saint-Exupéry (1943, p. 54).

RESUMO

O desenvolvimento de carvões magnéticos (CM) a partir de biomassas tem sido estudado como uma solução para a remediação de efluentes contendo metais tóxicos, como Pb(II), Cd(II) e Ni(II). Neste estudo, dois CM foram preparados por meio da carbonização hidrotérmica (CHT) do bagaço de cana-de-açúcar e nitrato férrico a 230 e 270 °C. Na sequência, os CM foram ativados termoquimicamente com KOH na proporção 1:2 (CM:KOH; m:m) a 500 e 700 °C, resultando em quatro carvões magnéticos ativados (CMA). Esses materiais foram caracterizados quanto às suas composições, estruturas, morfologias, texturas e grupos químicos de superfície. As análises estruturais indicaram a formação das fases α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ e Fe₃O₄ após a CHT. A subsequente ativação termoquímica com KOH a 700 °C resultou na presença de Fe⁰ e Fe₄[Fe(CN)₆]₃, além de maiores áreas superficiais específicas, com formação de cavidades bem desenvolvidas e maior hidrofilicidade. O CM produzido a 270 °C e ativado termoquimicamente com KOH a 700 °C apresentou a maior área superficial específica (702,8 m² g⁻¹) e maior capacidade de adsorção de Pb(II), Cd(II) e Ni(II), sendo selecionado para os estudos de adsorção multicomponente. A adsorção foi mais eficiente em pH 5,0, com uma dose de 0,50 g L⁻¹ de adsorvente. O equilíbrio foi atingido em 30 minutos de contato, sendo que os modelos de Pseudo-Primeira Ordem e Difusão-Quimissorção melhor se ajustaram aos dados cinéticos, sugerindo que a adsorção ocorre por mecanismos mistos. O modelo de Sips apresentou melhor ajuste aos dados isotérmicos, demonstrando a formação de multicamadas em concentrações menores e apresentando saturação dos sítios de adsorção em concentrações maiores. A adsorção foi favorecida pelo aumento da temperatura, sendo Pb(II) o mais influenciado. O estudo termodinâmico indicou que a adsorção foi espontânea e exotérmica para Pb(II), enquanto para Cd(II) e Ni(II) foi espontânea e endotérmica. O processo de dessorção multicomponente foi eficaz utilizando CH₃COOH 0,5 mol L⁻¹, preservando as propriedades magnéticas do material. Contudo, após três ciclos, houve uma tendência de diminuição da capacidade de adsorção e aumento na lixiviação de ferro, que afetou o magnetismo do material. O estudo indicou que a adsorção de Pb(II) ocorreu majoritariamente por meio da complexação com fenóis (quimissorção), enquanto a adsorção de Cd(II) e Ni(II) ocorreu principalmente por meio de troca iônica com o íon K⁺ e interação cátion- π (fisissorção). A ativação termoquímica com KOH a 700 °C foi eficaz, resultando em um material multifuncional com potencial para a remoção simultânea de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; carvão magnético; ativação termoquímica; sustentabilidade; metais tóxicos.

ABSTRACT

The development of magnetic carbons (MC) from biomass has been studied as a solution for the remediation of effluents containing toxic metals, such as Pb(II), Cd(II), and Ni(II). In this study, two MCs were prepared through hydrothermal carbonization (HTC) of sugarcane bagasse and ferric nitrate at 230 and 270 °C. Subsequently, the MCs were thermochemically activated with KOH at a 1:2 ratio (MC:KOH; m:m) at 500 and 700 °C, resulting in four magnetic activated carbons (MAC). These materials were characterized in terms of their composition, structure, morphology, texture, and surface chemical groups. Structural analyses indicated the formation of α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃, and Fe₃O₄ phases after HTC. The subsequent thermochemical activation with KOH at 700 °C resulted in the presence of Fe⁰ and Fe₄[Fe(CN)₆]₃, along with larger specific surface areas, the formation of well-developed cavities, and increased hydrophilicity. The MC produced at 270 °C and thermochemically activated with KOH at 700 °C exhibited the highest specific surface area (702.8 m² g⁻¹) and the highest adsorption capacity for Pb(II), Cd(II), and Ni(II), and was selected for multicomponent adsorption studies. Adsorption was most efficient at pH 5.0, with a dosage of 0.50 g L⁻¹ of adsorbent. Equilibrium was reached within 30 minutes of contact, with the Pseudo-First Order and Diffusion-Chemisorption models providing the best fit to the kinetic data, suggesting that the adsorption occurs via mixed mechanisms. The Sips model provided the best fit to the isotherm data, demonstrating the formation of multilayers at lower concentrations and saturation of the adsorption sites at higher concentrations. Adsorption was favored by increasing temperature, with Pb(II) being the most influenced. The thermodynamic study indicated that the adsorption of Pb(II) was spontaneous and exothermic, while for Cd(II) and Ni(II), it was spontaneous and endothermic. The multicomponent desorption process was effective using 0.5 mol L⁻¹ CH₃COOH, preserving the magnetic properties of the material. However, after three cycles, there was a tendency for the adsorption capacity to decrease and iron leaching to increase, which affected the material's magnetism. The study indicated that the adsorption of Pb(II) occurred primarily through complexation with phenols (chemisorption), while the adsorption of Cd(II) and Ni(II) occurred mainly through ion exchange with the K⁺ ion and cation- π interaction (physisorption). The thermochemical activation with KOH at 700 °C was effective, resulting in a multifunctional material with potential for the simultaneous removal of Pb(II), Cd(II), and Ni(II).

KEYWORDS: Biomass; magnetic carbon; thermochemical activation; sustainability; toxic metals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composição majoritária do bagaço de cana-de-açúcar.....	23
Figura 2. Combinação do tipo <i>core-shell</i> entre matriz carbonácea (externo: cinza/preto) e partículas de ferro (interno: vermelho). Branco represente as cavidades do material.....	24
Figura 3. Adsorvente magnético antes e depois de um processo de ativação. As cores preta/cinza, vermelha e branca representam, respectivamente, matriz carbonácea, partículas de ferro e cavidades do material.....	26
Figura 4. Resposta dos carvões magnéticos a) CM-230, b) CMA-230-2-5, c) CMA-230-2-7, d) CM-270, e) CMA-270-2-5 e f) CMA-270-2-7 ao campo magnético de um ímã de 420 mT por 30 segundos.	50
Figura 5. Perfis termogravimétricos (TG) correspondentes ao bagaço de cana-de-açúcar, CM-230, CMA-230-2-5, CMA-230-2-7, CM-270, CMA-270-2-5 e CMA-270-2-7. A imagem inserida no canto inferior direito mostra o resíduo TG do material CM-230, ilustrando a coloração avermelhada dos resíduos ao final da análise.	51
Figura 6. Difrátogramas correspondentes aos de a) CM-230, CMA-230-2-5 e CMA-230-2-7, e b) CM-270, CMA-270-2-5 e CMA-270-2-7. Δ representa a celulose (ICDD: 00-050-2241), θ representa o α -Fe ₂ O ₃ (ICDD: 01-073-0603), ν representa o γ -Fe ₂ O ₃ (ICDD: 00-039-1346), ϕ representa o Fe ₃ O ₄ (ICDD: 01-075-1609), ψ representa o Fe ⁰ (ICDD: 01-087-0721) e σ representa o Fe ₄ [Fe(CN) ₆] ₃ (ICDD: 01-073-0687).....	52
Figura 7. Microscopias eletrônicas de varredura e mapeamento de ferro, carbono e oxigênio em a) CM-230, b) CM-270, c) CMA-230-2-5, d) CMA-270-2-5, e) CMA-230-2-7 e f) CMA-270-2-7. As setas vermelhas indicam aumento de intensidade nos mapeamentos de ferro sem correspondência com o mapeamento de oxigênio.....	54
Figura 8. Microscopias eletrônicas de varredura obtidas por elétrons retroespalhados (BSE) dos materiais a) CM-230, b) CM-270, c) CMA-230-2-5, d) CMA-270-2-5, e) CMA-230-2-7 e f) CMA-270-2-7.	55
Figura 9. Espectros de infravermelho de a) bagaço de cana-de-açúcar, b) CM-230, c) CM-270, d) CMA-230-2-5, e) CMA-270-2-5, f) CMA-230-2-7 e g) CMA-270-2-7.....	57
Figura 10. Microscopias eletrônicas de varredura mostrando a transformação gradual dos materiais a) CM-230, b) CMA-230-2-5, c) CMA-270-2-5, d) CM-270, e) CMA-270-2-5 e f) CMA-270-2-7. As setas vermelhas indicam a formação de cavidades bem definidas.....	58
Figura 11. Isotermas de adsorção-dessorção de N ₂ dos CM-230, CM-270, CMA-230-2-5, CMA-270-2-5, CMA-230-2-7 e CMA-270-2-7.	59

Figura 12. Isothermas de adsorção-dessorção de N ₂ dos materiais controles ativados termicamente sem KOH: CMA-230-0-5, CMA-270-0-5, CMA-230-0-7 e CMA-270-0-7.....	60
Figura 13. Variação de ΔpH em função do pH inicial para os CM-230, CM-270, CMA-230-2-5, CMA-270-2-5, CMA-230-2-7 e CMA-270-2-7.....	63
Figura 14. Comparação das quantidades adsorvidas de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em soluções multicomponentes nas concentrações de a) 0,02 mmol L ⁻¹ , b) 0,25 mmol L ⁻¹ e c) 2,0 mmol L ⁻¹ . Tempo de contato: 24 horas, dose de adsorvente: 1,00 g L ⁻¹ , pH inicial: 4,5 e temperatura: 21,0 ± 0,4 °C.....	65
Figura 15. Comparação das quantidades adsorvidas de a) Pb(II), b) Cd(II) e c) Ni(II) em soluções mono e multicomponentes na concentração de 0,25 mmol L ⁻¹ . Tempo de contato: 24 horas, dose de adsorvente: 1,00 g L ⁻¹ , pH inicial: 4,5 e temperatura: 21,0 ± 0,4 °C.....	69
Figura 16. Adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em função do pH (2,0-6,0). Tempo de contato: 24 horas, concentração inicial: 0,25 mmol L ⁻¹ , dose de CMA-270-2-7: 1,00 g L ⁻¹ e temperatura: 21,0 ± 0,4 °C.	71
Figura 17. Adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II), lixiviação de Fe e COT em função da dose de CMA-270-2-7 (0,25-1,00 g L ⁻¹). Tempo de contato: 24 horas, pH inicial: 5,0 e temperatura: 21,0 ± 0,4 °C.....	73
Figura 18. Tempo de contato de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) (5-1440 min). pH inicial: 5,0, dose de CMA-270-2-7: 0,50 g L ⁻¹ , concentração das soluções multicomponentes: a) 0,25 mmol L ⁻¹ , b) 10,0 mmol L ⁻¹ e c) 100,0 mmol L ⁻¹ . Temperatura: 21,0 ± 0,4 °C.....	75
Figura 19. Ilustração sobre o processo de adsorção em função da concentração a) 0,25 mmol L ⁻¹ , b) 10,0 mmol L ⁻¹ e c)100,0 mmol L ⁻¹	77
Figura 20. Isotherma de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) (0,02-100,0 mmol L ⁻¹). Dose de CMA-270-2-7: 0,50 g L ⁻¹ , pH inicial: 5,0, tempo de contato: 30 minutos e temperatura: 21,0 ± 0,4 °C.	81
Figura 21. Isothermas de adsorção multicomponente em função da temperatura para a) Pb(II), b) Cd(II) e c) Ni(II). Dose de CMA-270-2-7: 0,50 g L ⁻¹ , pH inicial: 5,0, tempo de contato: 30 minutos e concentração: 0,02 – 100,0 mmol L ⁻¹	85
Figura 22. Eficiência de dessorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) utilizando diferentes eluentes (HCl 0,5 mol L ⁻¹ , CH ₃ COOH 0,5 mol L ⁻¹ , HNO ₃ 0,5 mol L ⁻¹ e H ₂ O), bem como a lixiviação de Fe e COT.	94

Figura 23. Adsorção e dessorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em função dos ciclos. Dose de CMA-270-2-7: 0,50 g L ⁻¹ , pH inicial: 5,0, tempo de contato: 30 minutos, concentração: 100,0 mmol L ⁻¹ e temperatura: 21,0±0,4 °C	96
Figura A 1. Curva analítica de calibração obtida para Pb total por FAAS.....	117
Figura A 2. Curva analítica de calibração obtida para Cd total por FAAS.....	117
Figura A 3. Curva analítica de calibração obtida para Ni total por FAAS.....	118
Figura A 4. Curva analítica de calibração obtida para Fe total por FAAS.....	118
Figura A 5. Curva analítica de calibração obtida para K total por FAAS.....	119
Figura B 1. Especificação química de Pb(II) na concentração de 2,0 mmol L ⁻¹	120
Figura B 2. Especificação química de Cd(II) na concentração de 2,0 mmol L ⁻¹	120
Figura B 3. Especificação química de Ni(II) na concentração de 2,0 mmol L ⁻¹	121
Figura C 1. Ajustes não lineares aos modelos cinéticos de a) PPO, b) PSO, c) DI e d) DQ para CMA-270-2-7 na adsorção multicomponente de Pb(II).....	122
Figura C 2. Ajustes não lineares aos modelos cinéticos de a) PPO, b) PSO, c) DI e d) DQ para CMA-270-2-7 na adsorção multicomponente de Cd(II).	123
Figura C 3. Ajustes não lineares aos modelos cinéticos de a) PPO, b) PSO, c) DI e d) DQ para CMA-270-2-7 na adsorção multicomponente de Ni(II).	124
Figura C 4. Ajustes não lineares aos modelos isotérmicos de LA, FR, SI, TE, LAE e SIE para CMA-270-2-7 na adsorção multicomponente de a) Pb(II), b) Cd(II) e c) Ni(II).	125
Figura C 5. Ajustes não lineares aos modelos isotérmicos de LA, FR, SI, TE, LAE e SIE para CMA-270-2-7 na adsorção multicomponente de Pb(II) nas temperaturas de a) 20 °C, b) 29 °C, c) 34 °C e d) 44 C.	127
Figura C 6. Ajustes não lineares aos modelos isotérmicos de LA, FR, SI, TE, LAE e SIE para CMA-270-2-7 na adsorção multicomponente de Cd(II) nas temperaturas de a) 20 °C, b) 29 °C, c) 34 °C e d) 44 C.	128
Figura C 7. Ajustes não lineares aos modelos isotérmicos de LA, FR, SI, TE, LAE e SIE para CMA-270-2-7 na adsorção multicomponente de Ni(II) nas temperaturas de a) 20 °C, b) 29 °C, c) 34 °C e d) 44 C.	129
Figura D 1. Ajustes lineares de ln K _e ⁰ versus T ⁻¹ para obtenção dos parâmetros termodinâmicos de adsorção de a) Pb(II), b) Cd(II) e c) Ni(II).....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condições instrumentais para a determinação de chumbo total (Pb), cádmio total (Cd), níquel total (Ni), ferro total (Fe) e potássio total (K) empregando FAAS, segundo o fabricante.	45
Tabela 2. Valores médios de pH, massa e rendimento em massa recuperada (R_{CM}) referentes as sínteses de CM-230 e CM-270.....	46
Tabela 3. Valores médios de pH, temperatura, massa, rendimento em massa recuperada (R_{CMA}) e rendimento final (R_F) referentes às ativações termoquímicas de CM-230 e CM-270.....	46
Tabela 4. Valores médios de massa, rendimento em massa recuperada (R_{CMA-C}) e rendimento final (R_F) referentes às ativações térmicas de CM-230 e CM-270 (grupos controles).....	47
Tabela 5. Propriedades químicas dos CM e CMA: Teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), ferro (Fe) e potássio (K).	49
Tabela 6. Características químicas do bagaço, CM e CMA: Análise do teor de água adsorvida e cinzas por meio de análises de TG.	50
Tabela 7. Propriedades texturais obtidas por meio das isotermas de adsorção-dessorção de N_2	61
Tabela 8. Identificação e quantificação de fenóis, grupos lactônicos e ácidos carboxílicos presentes nos materiais CM-230, CM-270, CMA-230-2-5, CMA-270-2-5, CMA-230-2-7 e CMA-270-2-7. Desvio $\leq \pm 5\%$	62
Tabela 9. Valores de pH_{zpc} e pH final de adsorção obtidos para os CM e CMA.	64
Tabela 10. Valores de pH inicial ajustado e final obtidos no estudo de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em função do pH, incluindo os controles (somente soluções multicomponentes).....	72
Tabela 11. Parâmetros cinéticos de adsorção obtidos pela regressão não linear dos modelos cinéticos de PPO, PSO, DI e DQ, bem como o R^2 , RMSE e χ^2	78
Tabela 12. Parâmetros isotérmicos de adsorção obtidos pela regressão não linear dos modelos isotérmicos de FR, LA, LAE, SI, SIE e TE, bem como o R^2 , RMSE e χ^2	81
Tabela 13. Comparação dos resultados de adsorção obtidos pelo melhor material neste trabalho com outros materiais apresentados na literatura.	84
Tabela 14. Parâmetros isotérmicos de adsorção obtidos em função da temperatura por meio da regressão não linear dos modelos isotérmicos de FR, LA, LAE, SI, SIE e TE, bem como o R^2 , RMSE e χ^2	87
Tabela 15. Parâmetros termodinâmicos de adsorção de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).	92

Tabela E 1. Porcentagens relativas à lixiviação de Fe no experimento preliminar de dessorção com diferentes eluentes.....132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADJ R²	Coefficiente de determinação ajustado
ATR	Acessório de Refletância Total Atenuada
BET	Área específica calculada pelo modelo matemático de Brunauer, Emmett e Teller
BJH	Volume total de poros calculado pelo modelo de Barrett, Joyner e Halenda
BSE	Microscopia Eletrônica de Varredura por Retroespalhamento de Elétrons
CA	Carvão ativado
CH	Carvão hidrotérmico
CHN	Análise Elementar CHN
CHT	Carbonização Hidrotérmica
CM	Carvão magnético
CM-230	Carvão magnético sintetizado a 230 °C
CM-270	Carvão magnético sintetizado a 270 °C
CMA	Carvão magnético ativado
CMA-230-0-5	Carvão magnético sintetizado a 230 °C e ativado sem KOH a 500 °C
CMA-230-0-7	Carvão magnético sintetizado a 230 °C e ativado sem KOH a 700 °C
CMA-230-2-5	Carvão magnético sintetizado a 230 °C e ativado com KOH (1:2; m:m) a 500 °C
CMA-230-2-7	Carvão magnético sintetizado a 230 °C e ativado com KOH (1:2; m:m) a 700 °C
CMA-270-0-5	Carvão magnético sintetizado a 270 °C e ativado sem KOH a 500 °C
CMA-270-0-7	Carvão magnético sintetizado a 270 °C e ativado sem KOH a 700 °C
CMA-270-2-5	Carvão magnético sintetizado a 270 °C e ativado com KOH (1:2; m:m) a 500 °C
CMA-270-2-7	Carvão magnético sintetizado a 270 °C e ativado com KOH (1:2; m:m) a 700 °C
COT	Carbono orgânico total
DI	Difusão Intrapartícula
DQ	Difusão-Quimissorção
DRX	Difração de Raios X
EDS	Detector de Energia Dispersiva de Raios X

FAAS	Espectrofotometria de Absorção Atômica com Atomização por Chama
FR	Modelo de Freundlich
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
LA	Modelo de Langmuir
LAE	Modelo de Langmuir Estendido
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
pH	Potencial hidrogeniônico
pH_{zpc}	pH de carga zero
PPO	Pseudo-Primeira Ordem
PSO	Pseudo-Segunda Ordem
PVDF	Cloreto de polivinilideno
R	Constante universal dos gases
R²	Coefficiente de determinação
RMSE	Erro quadrático médio
SI	Modelo de Sips
SIE	Modelo de Sips Estendido
TB	Titulação Boehm
TE	Modelo de Temkin
TGA	Termogravimetria
χ^2	Chi-quadrado

LISTA DE SÍMBOLOS

mg	Miligramma
L	Litro
Kg	Quilograma
°C	Graus Celsius
g	Gramma
cm³	Centímetro cúbico
nm	Nanômetro
m²	Metro quadrado
mol	$6,02 \times 10^{23}$ átomos/moléculas/íons
ΔH	Entalpia
ΔS	Entropia
ΔG	Energia livre de Gibbs
mL	Mililitros
mm	Milímetros
min	Minutos
h	Horas
Å	Angstrom
λ	Lambda
kV	Kilovolt
mA	Miliampere
°	Grau
μm	Micrometro
mmol	$6,02 \times 10^{26}$ átomos/moléculas/íons
±	Mais ou menos
θ	Theta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. SÍNTESE E PROPRIEDADES DOS CARVÕES MAGNÉTICOS	23
2.2. ATIVAÇÃO DE CARVÕES MAGNÉTICOS	26
2.3. ADSORÇÃO MULTICOMPONENTE E TOXICIDADE DE CHUMBO, CÁDMIO E NÍQUEL	28
3. OBJETIVO	32
4. PARTE EXPERIMENTAL	33
4.1. SÍNTESE DE CARVÃO MAGNÉTICO UTILIZANDO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E NITRATO FÉRRICO.....	33
4.2. ATIVAÇÃO TERMOQUÍMICA COM HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO.....	33
4.3. CARACTERIZAÇÕES	34
4.3.1. Investigação composicional e estrutural.....	34
4.3.2. Investigação morfológica e textural	35
4.3.3. Investigação dos grupos químicos superficiais	36
4.4. ESTUDOS DE ADSORÇÃO DE Pb(II), Cd(II) E Ni(II)	36
4.4.1. Avaliação da adsorção multi e monocomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).....	36
4.4.2. Adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em função do ph.....	37
4.4.3. Adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em função da dose de adsorvente.....	38
4.4.4. Cinética de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II)	38
4.4.5. Isoterma de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).....	39
4.4.6. Parâmetros termodinâmicos de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).....	41
4.4.7. Adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em ciclos	42
4.4.7.1. Avaliação das eficiências de dessorção com diferentes eluentes.....	42
4.4.7.2. Estudos de adsorção em ciclos.....	43
4.5. QUANTIFICAÇÃO DE Pb, Cd, Ni, Fe E K TOTAL.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1. SÍNTESE E ATIVAÇÃO DE CM-230 E CM-270	46
5.2. CARACTERIZAÇÕES	48
5.2.1. Investigação composicional e estrutural.....	48
5.2.2. Investigação morfológica e textural	58
5.2.3. Investigação dos grupos químicos superficiais	61
5.3. ESTUDOS DE ADSORÇÃO DE Pb(II), Cd(II) E Ni(II)	64

5.3.1.	Avaliação da adsorção multi e monocomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).....	64
5.3.2.	Adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em função do ph.....	70
5.3.3.	Adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em função da dose de adsorvente.....	72
5.3.4.	Cinética de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II)	74
5.3.5.	Isotherma de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).....	80
5.3.6.	Parâmetros termodinâmicos de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).....	84
5.3.7.	Adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II) em ciclos	93
5.3.7.1.	Avaliação das eficiências de dessorção com diferentes eluentes.....	93
5.3.7.2.	Estudos de adsorção em ciclos.....	95
5.3.8.	Mecanismo de adsorção multicomponente de Pb(II), Cd(II) e Ni(II).....	96
6.	CONCLUSÃO.....	98
7.	DESAFIOS FUTUROS	100
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICE A - CURVAS ANALÍTICAS DE CALIBRAÇÃO OBTIDAS POR FAAS	117
	APÊNDICE B - ESPECIAÇÃO QUÍMICA DE Pb(II), Cd(II) E Ni(II) NO EXPERIMENTO PRELIMINAR.....	120
	APÊNDICE C - REGRESSÃO NÃO LINEAR DOS MODELOS CINÉTICOS E ISOTÉRMICOS.	122
	APÊNDICE D - REGRESSÃO LINEAR PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS TERMODINÂMICOS.	130
	APÊNDICE E - PORCENTAGENS RELATIVAS À LIXIVIAÇÃO DE FE DO EXPERIMENTO DE ADSORÇÃO EM CICLOS.....	132
	DADOS CURRICULARES	133

1. INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes industriais que contêm metais tóxicos perpetua como uma questão de considerável relevância, suscitando preocupações de alcance global (ANGON et al., 2024; GOMES et al., 2023; TARVIJI et al., 2023). Isso se deve à notável persistência desses metais (ou íons) que demonstram propensão à bioacumulação nos diferentes níveis tróficos (KOLAROVA; NAPIÓRKOWSKI, 2021; SHARMA et al., 2021). Dentre os metais tóxicos comumente encontrados em efluentes aquosos, destacam-se o chumbo (Pb), cádmio (Cd) e níquel (Ni), cuja principal origem está associada aos processos de natureza industrial, principalmente as indústrias de tintas, baterias, galvanoplastia em ferro e aço, pesticidas e combustíveis fósseis (NICHOLSON et al., 2003; RENU et al., 2021; VAHIDIPOUR; RAEISI; VAN DER ZEE, 2022). Esses metais integram a Lista de Prioridades de Substâncias da Agência de Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças que leva em conta critérios de ocorrência, toxicidade e potencial risco à exposição humana (ATSDR, 2022). No Brasil, as diretrizes para lançamento de efluentes em corpos aquáticos são estabelecidas pela Resolução nº 430 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), datada de 13 de maio de 2011, impondo valores máximos de concentração de 0,5, 0,2 e 2,0 mg L⁻¹ para Pb, Cd e Ni totais, respectivamente (BRASIL, 2011).

Nesse cenário, fica evidente a necessidade de ampliar as pesquisas no desenvolvimento de materiais e tecnologias destinadas a assegurar o tratamento eficaz de efluentes contendo metais (HUANG et al., 2023; TOPARE; WADGAONKAR, 2022). Diversos processos têm sido empregados para a remoção de metais, incluindo adsorção, filtração, precipitação, coagulação, membrana de troca iônica e eletrodialise (BALRAM; SINGH KAITH, 2022; JOSEPH et al., 2019; KHARRAZI et al., 2021; SHARMA; PETRUSEVSKI; AMY, 2008), entre outros. Alguns desafios são comuns em processos de adsorção, como a necessidade de regeneração eficiente, a dependência de condições operacionais como pH e temperatura, o descarte adequado dos materiais saturados, a baixa seletividade sem funcionalização e a aplicação em larga escala, que pode ser difícil em ambientes com pouco espaço (FAMOBUWA et al., 2025; MAFTOUH et al., 2023; MEI; ZHUANG; WANG, 2025; YOUNAS et al., 2021). Contudo, a adsorção é amplamente reconhecida na literatura científica como um processo eficaz, economicamente viável e ecologicamente responsável, sendo objeto de diversas pesquisas voltadas para o desenvolvimento de adsorventes com elevadas áreas superficiais específicas e capacidades de adsorção (GOTORE; MASERE; MURONDA, 2024; HSU et al., 2024; SIDDIQUI et al., 2019).

O carvão ativado (CA), zeólita, sílica gel e alumina ativada são os adsorventes mais empregados devido ao menor custo e maiores áreas superficiais específicas quando comparadas

às de outros adsorventes (BUKVA et al., 2023; THAKUR et al., 2022). No entanto, visando o aproveitamento de biomassas geradas em grandes quantidades pelo setor agroindustrial, tal como o bagaço de cana-de-açúcar (LARANJA et al., 2022; RAJ; CHAUHAN; PAL, 2022), e a produção de adsorventes que possam ser reutilizados, tem sido crescente o interesse no desenvolvimento de carvões magnéticos (CM), que são constituídos pela combinação de uma matriz carbonácea e partículas magnéticas, como $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 e Fe^0 (BITTENCOURT; GHOSH; FROTA, 2025; SIDDIQUI et al., 2019), facilitando a recuperação dos adsorventes por meio de atração magnética mediante o uso de um ímã (MENSAH et al., 2022; QIU et al., 2014; ZHU et al., 2015).

Os processos mais empregados na produção de CM são pirólise (SIDDIQUI et al., 2018, 2019; ZHANG et al., 2020), tratamento térmico com baixo teor de oxigênio (GAO et al., 2022; SIDDIQUI et al., 2019) e carbonização hidrotérmica (CHT) (LARANJA et al., 2022; SIDDIQUI et al., 2018, 2019). A pirólise e o tratamento térmico com baixo teor de oxigênio são realizados em duas etapas, enquanto a CHT é executada em uma única etapa. Em vista disso, a CHT tem por vantagem dispensar a etapa de pré-secagem após a mistura da biomassa com o precursor de partículas magnéticas, que é um procedimento realizado em meio aquoso (ADOLFSSON; YADAV; HAKKARAINEN, 2020; WANG; CHANG; LI, 2019), além de resultar em resposta magnética operando a temperaturas mais brandas, podendo resultar em menor lixiviação de ferro devido ao possível recobrimento com a matriz carbonácea (HU et al., 2010; SIDDIQUI et al., 2019; WANG et al., 2024).

Com o intuito de melhorar as propriedades de adsorção desses materiais, recorre-se a processos de ativação, incluindo ativações químicas, térmicas (físicas) ou termoquímicas. Esses tratamentos têm como objetivo ampliar ou desbloquear os poros, incrementando a quantidade de sítios ativos disponíveis para a adsorção (HUSIEN et al., 2022), além de melhorar a propriedade magnética do CM (SEVILLA; FERRERO; FUERTES, 2017; WONG et al., 2018). Dentre esses processos, tem sido reportado que a ativação termoquímica utilizando diversos agentes de ativação ácidos ou básicos promove o aumento da área superficial específica dos materiais empregando temperaturas e tempos de ativação menores (CHEN et al., 2020; SUHAS et al., 2016). O hidróxido de potássio (KOH) é amplamente empregado como agente de ativação em estudos de ativação termoquímica devido a sua disponibilidade e custo. Além disso, a reação do KOH durante o processo de ativação resulta na geração de gases que promovem a formação de uma quantidade significativa de poros na superfície do material, o que contribui para um aumento substancial na capacidade de adsorção dos adsorventes (CHEN et al., 2020; GÓMEZ et al., 2022; HOSSAIN et al., 2022; NOGUEIRA et al., 2024).

Uma grande variedade de adsorventes tem sido utilizada, porém, é oportuno salientar que a maioria dos adsorventes desenvolvidos vêm sendo testados para a remoção de poluentes em sistemas monocomponentes. Em efluentes industriais, os íons metálicos coexistem na forma de misturas complexas, tornando relevantes pesquisas visando o desenvolvimento de materiais capazes de removê-los simultaneamente (RAJ; CHAUHAN; PAL, 2022). Dessa forma, formulou-se a hipótese de que a ativação termoquímica com KOH poderia aumentar a área superficial específica e melhorar as propriedades de adsorção dos CM, permitindo que esses materiais fossem utilizados para a adsorção simultânea de Pb, Cd e Ni em soluções aquosas.

6. CONCLUSÃO

Este estudo investigou a síntese e caracterização de dois carvões magnéticos derivados do bagaço de cana-de-açúcar e nitrato férrico empregando a carbonização hidrotérmica a 230 e 270 °C, seguida de ativação termoquímica com KOH a 500 e 700 °C. Os resultados da análise elementar CHN indicaram que a temperatura de carbonização não teve influência significativa na composição dos materiais, enquanto a presença de nitrato férrico na síntese contribuiu para a incorporação de nitrogênio na estrutura dos carvões magnéticos. A caracterização estrutural revelou a predominância de grupos funcionais fenólicos nos materiais, além da coexistência de fases de ferro α -Fe₂O₃ e γ -Fe₂O₃, com a presença adicional de Fe₃O₄ apenas no CMA-270. A ativação termoquímica com KOH a 500 e 700 °C resultou em um aumento significativo nos teores de carbono e nitrogênio, bem como na formação de cavidades e incremento na hidrofiliabilidade e área superficial específica dos materiais. Observou-se também uma mudança nas fases de ferro presentes nos carvões magnéticos após a ativação termoquímica, com a identificação de Fe⁰, Fe₃O₄ e o complexo Fe₄(Fe(CN)₆)₃ apenas nos materiais ativados a 700 °C. Os resultados indicaram que os CMA ativados com KOH apresentaram desempenho superior na adsorção de Pb(II), Cd(II) e Ni(II), com destaque para o CMA-270-2-7 devido à sua elevada área superficial e propriedades texturais aprimoradas. A adsorção seguiu a ordem Pb(II) > Cd(II) > Ni(II), refletindo as diferenças nos raios de hidratação e afinidade pelos grupos funcionais dos adsorventes. Em sistemas multicomponentes, a competição iônica reduziu a eficiência de adsorção em comparação aos sistemas monocomponentes. O CMA-270-2-7 se destacou pela maior hidrofiliabilidade, área superficial e macroporos bem desenvolvidos. O pH 5,0 foi o mais adequado para a adsorção multicomponente, e a dose ideal de adsorvente foi 0,50 g L⁻¹, pois evitou a lixiviação excessiva de Fe e COT. A cinética de adsorção foi rápida, atingindo o equilíbrio em 30 minutos, e a seletividade variou com a concentração inicial dos íons metálicos, sendo Pb(II) preferencialmente adsorvido em baixas concentrações. Os resultados experimentais se ajustaram melhor aos modelos cinéticos de Pseudo-Primeira Ordem e Difusão-Quimissorção, sugerindo que a adsorção é governada por mecanismos mistos. As isotermas multicomponentes mostraram que o CMA-270-2-7 possui elevada capacidade de adsorção, com saturação dos sítios ativos em 100,0 mmol L⁻¹. O modelo de Sips descreveu adequadamente a adsorção, evidenciando a formação de multicamadas e a limitação da adsorção em altas concentrações. O material demonstrou desempenho competitivo em relação a outros adsorventes na literatura, destacando-se como uma alternativa promissora para a remoção de íons metálicos. A adsorção foi favorecida pelo aumento da temperatura, com maior influência para Pb(II), e a termodinâmica indicou que

o processo foi espontâneo e exotérmico para Pb(II), e espontâneo e endotérmico para Cd(II) e Ni(II). A adsorção de Pb(II) foi predominantemente por meio da interação/complexação com fenóis (quimissorção), enquanto a de Cd(II) e Ni(II) ocorreu por meio de troca iônica com K^+ e interação cátion- π (fisissorção). O CH_3COOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ foi o eluente mais eficaz para a dessorção multicomponente, preservando as propriedades magnéticas do CMA-270-2-7. No entanto, a capacidade de adsorção do material apresentou tendência de diminuição ao longo dos ciclos, com perdas estruturais observadas.

REFERÊNCIAS

- ABAS, S. N. A. et al. Adsorption process of heavy metals by low-cost adsorbent: A review. **World Applied Sciences Journal**, v. 28, n. 11, p. 1518–1530, 2013.
- ABOU OUALID, H. et al. Eco-efficient green seaweed *Codium decorticatum* biosorbent for textile dyes: Characterization, mechanism, recyclability, and rsm optimization. **ACS Omega**, v. 5, n. 35, p. 22192–22207, 8 set. 2020.
- ADOLFSSON, K. H.; YADAV, N.; HAKKARAINEN, M. Cellulose-derived hydrothermally carbonized materials and their emerging applications. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 23, p. 18–24, 2020.
- AJALA, E. O. et al. Sugarcane bagasse: a biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 8, n. 1, 2021.
- AL-AHMED, Z. A. Surface methodology for optimized adsorption of hazardous organic pollutant from aqueous solutions via novel magnetic metal organic framework: Kinetics, isotherm study, and DFT calculations. **Journal of Molecular Liquids**, p. 125507, jul. 2024.
- AL-QODAH, Z. et al. Processing and characterization of magnetic composites of activated carbon, fly ash, and beach sand as adsorbents for Cr(VI) removal. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 7, p. 100333, 1 jun. 2023.
- AMIRI, M. J.; RAAAYATPISHEH, M. Adsorption behavior of cationic dyes on starch nanocrystals: Kinetic, isotherm, and thermodynamic insights from single to multi-component systems. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 281, p. 136310, 1 nov. 2024.
- ANGON, P. B. et al. Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. **Heliyon**, v. 10, n. 7, p. e28357, abr. 2024.
- ARCIBAR-OROZCO, J. A.; RANGEL-MENDEZ, J. R.; DIAZ-FLORES, P. E. Simultaneous adsorption of Pb(II)-Cd(II), Pb(II)-phenol, and Cd(II)-phenol by activated carbon cloth in aqueous solution. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 226, n. 1, 1 jan. 2015.
- ARORA, R. Adsorption of heavy metals-a review. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 4745–4750, 2019.
- ARRUEBO, M. et al. Magnetic nanoparticles for drug delivery. **Nano Today**, v. 2, n. 3, p. 22–32, 1 jun. 2007.
- ARSHADI, M.; AMIRI, M. J.; MOUSAVI, S. Kinetic, equilibrium and thermodynamic investigations of Ni(II), Cd(II), Cu(II) and Co(II) adsorption on barley straw ash. **Water Resources and Industry**, v. 6, p. 1–17, 1 ago. 2014.
- BALRAM; SINGH KAITH, B. Removal of hazardous metal ions from polluted water using biomaterial-based ion- exchangers: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 53, p. 174–178, 1 jan. 2022.

BAYUO, J. et al. Adsorption and desorption processes of toxic heavy metals, regeneration and reusability of spent adsorbents: Economic and environmental sustainability approach. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 329, p. 103196, 1 jul. 2024.

BENTO, L. R. et al. Release of nutrients and organic carbon in different soil types from hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinasse. **Geoderma**, v. 334, p. 24–32, 15 jan. 2019.

BITTENCOURT, A. C. R.; GHOSH, A.; FROTA, H. O. Magnetization and conductance of a magnetic adatom adsorbed on single-walled carbon nanotubes. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 614, p. 172763, 15 fev. 2025.

BOEHM, H. P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. **Carbon**, v. 32, n. 5, p. 759–769, 1 jan. 1994.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. **Adsorption of Gases in Multimolecular Layers**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/sharingguidelines>>.

BUKVA, M. et al. A review on the design and application of bi-functionalized adsorbents to remove different pollutants from water. **Journal of Water Process Engineering**, v. 53, p. 103636, 1 jul. 2023.

ÇAKO, E. et al. **Recent advances on magnetic carbon-related materials in advanced oxidation processes of emerging pollutants degradation**. **Water Resources and Industry** Elsevier B.V., , 1 jun. 2024.

Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density. . [s.l: s.n.].

CHEN, Q. et al. Synergetic effect on methylene blue adsorption to biochar with gentian violet in dyeing and printing wastewater under competitive adsorption mechanism. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 26, p. 101099, 1 ago. 2021.

CHEN, T. et al. One-step hydrothermal synthesis of carbon@Fe₃O₄ nanoparticles with high adsorption capacity. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 25, n. 3, p. 1381–1387, 2014.

CHEN, W. et al. Insight into KOH activation mechanism during biomass pyrolysis: Chemical reactions between O-containing groups and KOH. **Applied Energy**, v. 278, p. 115730, 15 nov. 2020.

CHEN, X. et al. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review. **Chemosphere**, v. 307, p. 135545, 1 nov. 2022.

CHU, T. T. H.; NGUYEN, M. V. Improved Cr (VI) adsorption performance in wastewater and groundwater by synthesized magnetic adsorbent derived from Fe₃O₄ loaded corn straw biochar. **Environmental Research**, v. 216, p. 114764, 1 jan. 2023.

CUNNINGHAM, I. D.; BHAILA, K.; POVEY, D. C. Computational calculation of absolute aqueous pKa values for phenols. **Computational and Theoretical Chemistry**, v. 1019, n. 1, p. 55–60, 1 set. 2013.

DE GISI, S. et al. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 9, p. 10–40, 2016.

DEMARCHI, C. A. et al. Preparation, characterization, and application of magnetic activated carbon from termite feces for the adsorption of Cr(VI) from aqueous solutions. **Powder Technology**, v. 354, p. 432–441, 2019.

DEMONT, I. et al. Monitoring natural organic matter in drinking water treatment with photoelectrochemical oxygen demand. **AWWA Water Science**, v. 6, n. 3, 1 maio 2024.

DENG, S. et al. Study on the adsorption performance of carbon-magnetic modified sepiolite nanocomposite for Sb(V), Cd(II), Pb(II), and Zn(II): Optimal conditions, mechanisms, and practical applications in mining areas. **Journal of Hazardous Materials**, v. 487, p. 137129, 5 abr. 2025.

DIAZ DE TUESTA, J. L. et al. Performance and modeling of Ni(II) adsorption from low concentrated wastewater on carbon microspheres prepared from tangerine peels by FeCl₃-assisted hydrothermal carbonization. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, 1 out. 2022.

DJANDJA, O. S. et al. **Activated nitrogen-doped porous carbon from organic solid waste to energy storage materials: Pore structure forming and N-doping paths from recent methods.** **Journal of Energy Storage** Elsevier Ltd, , 20 set. 2024.

DOBRUSKIN, V. K. Contribution of the edge effect to physical adsorption in micropores of activated carbons. **Carbon**, v. 40, n. 5, p. 659–666, 1 abr. 2002.

DOKE, K. M.; KHAN, E. M. **Adsorption thermodynamics to clean up wastewater; critical review.** **Reviews in Environmental Science and Biotechnology** Kluwer Academic Publishers, , 1 mar. 2013.

DONG, M. et al. Challenges in safe environmental applications of biochar: identifying risks and unintended consequence. **Biochar**, v. 7, n. 1, p. 12, 14 jan. 2025.

ECE, M. Ş.; KUTLUAY, S. Remarkable adsorptive capacity and reusability performance of magnetic magnetite@silica@L-histidine nanocomposite towards gaseous benzene pollutant. **Ceramics International**, v. 50, n. 24, p. 54823–54834, 15 dez. 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, U. **METHOD 3050B ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS 1.0 SCOPE AND APPLICATION.** [s.l: s.n.].

FALCO, C.; BACCILE, N.; TITIRICI, M. M. Morphological and structural differences between glucose, cellulose and lignocellulosic biomass derived hydrothermal carbons. **Green Chemistry**, v. 13, n. 11, p. 3273–3281, 2011.

FAMOBUWA, V. et al. A review of biomass-based adsorption for rare earth elements recovery. **Journal of Rare Earths**, 7 mar. 2025.

FERNÁNDEZ-SANROMÁN, Á. et al. **Bridging the gap to hydrochar production and its application into frameworks of bioenergy, environmental and biocatalysis areas.** **Bioresource Technology** Elsevier Ltd, , 1 jan. 2021.

FOWLER, B. A. **Monitoring of human populations for early markers of cadmium toxicity: A review.** **Toxicology and Applied Pharmacology**, 1 ago. 2009.

GAO, K. et al. The hierarchically nitrogenous magnetic porous carbon prepared by ZIF-67 through mesoporous silica-protected calcination for rapid Cr(VI) removal. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 329, p. 111517, 1 jan. 2022.

GIRISH, C. R. Various isotherm models for multicomponent adsorption: A review Manipal Academy of Higher Education VARIOUS ISOTHERM MODELS FOR MULTICOMPONENT ADSORPTION: A REVIEW. **IJCIET_08_10_010 International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, n. 10, p. 80–86, 2017.

GOERTZEN, S. L. et al. Standardization of the Boehm titration. Part I. CO₂ expulsion and endpoint determination. **Carbon**, v. 48, n. 4, p. 1252–1261, 1 abr. 2010.

GOMES, D. F. et al. Ecological risk assessment for metals in sediment and waters from the Brazilian Amazon region. **Chemosphere**, v. 345, 1 dez. 2023.

GÓMEZ, I. C. et al. Role of KCl in activation mechanisms of KOH-chemically activated high surface area carbons. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 66, n. September, p. 0–1, 2022.

GOTORE, O.; MASERE, T. P.; MURONDA, M. T. The immobilization and adsorption mechanisms of agro-waste based biochar: A review on the effectiveness of pyrolytic temperatures on heavy metal removal. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, abr. 2024.

GREISH, A. A. et al. Adsorption of phenol and 2,4-dichlorophenol on carbon-containing sorbent produced from sugar cane bagasse. **Mendeleev Communications**, v. 31, n. 1, p. 121–122, 2021.

HAN, R. et al. Heterogeneous precipitation behavior and mechanism during the adsorption of cationic heavy metals by biochar: Roles of inorganic components. **Journal of Hazardous Materials**, v. 480, p. 136322, 5 dez. 2024.

HANAS, J. S. et al. **Lead Inhibition of DNA-Binding Mechanism of Cys 2 His 2 Zinc Finger Proteins** ABBREVIATIONS: TFIIIA, transcription factor A for RNA polymerase III MOLECULAR PHARMACOLOGY. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.molpharm.org>>.

HÄNSCH, R.; MENDEL, R. R. **Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl).** **Current Opinion in Plant Biology**, jun. 2009.

HASHEMPOUR, Y. et al. Assessing vulnerability to climate change for total organic carbon in a system of drinking water supply. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101904, 1 fev. 2020.

HAYNES, W. M.; LIDE, D. R.; BRUNO, T. J. **CRC Handbook of Chemistry and Physics 97th Edition**. [s.l: s.n.].

HE, S. et al. Competitive adsorption of Cd²⁺, Pb²⁺ and Ni²⁺ onto Fe³⁺-modified argillaceous limestone: Influence of pH, ionic strength and natural organic matters. **Science of the Total Environment**, v. 637–638, p. 69–78, 1 out. 2018.

HIKMAT, N. A.; QASSIM, B. B.; KHETHI, M. T. Thermodynamic and Kinetic Studies of Lead Adsorption from Aqueous Solution onto Petiole and Fiber of Palm Tree. **American Journal of Chemistry**, v. 2014, n. 4, p. 116–124, 2014.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 564–573, 1 nov. 2012.

HOSSAIN, N. et al. The effect of KOH activation and Ag nanoparticle incorporation on rice husk-based porous materials for wastewater treatment. **Chemosphere**, v. 291, n. P3, p. 132760, 2022.

HSU, C. Y. et al. **Adsorption of heavy metal ions use chitosan/graphene nanocomposites: A review study**. **Results in Chemistry** Elsevier B.V., , 1 jan. 2024.

HU, B. et al. Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass. **Advanced Materials**, v. 22, n. 7, p. 813–828, 2010.

HU, J. et al. An economical preparation strategy of magnetic biochar with high specific surface area for efficient removal of methyl orange. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 276, p. 134156, 1 set. 2024.

HUANG, X. et al. Quantity or quality: Environmental legislation and corporate green innovations. **Ecological Economics**, v. 204, p. 107684, 1 fev. 2023.

HUDA, B. N.; WAHYUNI, E. T.; MUDASIR, M. Simultaneous adsorption of Pb(II) and Cd(II) in the presence of Mg(II) ion using eco-friendly immobilized dithizone on coal bottom ash. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 45, p. 315–327, 1 jul. 2023.

HUSIEN, S. et al. Review of activated carbon adsorbent material for textile dyes removal: Preparation, and modelling. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 5, p. 100325, 1 jan. 2022.

JAIN, A.; TRIPATHI, S. K. Fabrication and characterization of energy storing supercapacitor devices using coconut shell based activated charcoal electrode. **Materials Science and Engineering: B**, v. 183, n. 1, p. 54–60, 1 abr. 2014.

JOSEPH, L. et al. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. **Chemosphere**, v. 229, p. 142–159, 1 ago. 2019.

JOSEPH, I. V.; TOSHEVA, L.; DOYLE, A. M. Simultaneous removal of Cd(II), Co(II), Cu(II), Pb(II), and Zn(II) ions from aqueous solutions via adsorption on FAU-type zeolites prepared from coal fly ash. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 4, 1 ago. 2020.

KALANTARI, M. et al. Rattle-type magnetic mesoporous hollow carbon as a high-performance and reusable adsorbent for water treatment. **Chemosphere**, v. 166, p. 109–117, 1 jan. 2017.

KE, P. et al. Magnetic carbon microspheres as a reusable catalyst in heterogeneous Fenton system for the efficient degradation of phenol in wastewater. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 638, n. December 2021, p. 128265, 2022.

KHAMIS, F. et al. **Comprehensive review on pH and temperature-responsive polymeric adsorbents: Mechanisms, equilibrium, kinetics, and thermodynamics of adsorption processes for heavy metals and organic dyes.** **Chemosphere** Elsevier Ltd, , 1 fev. 2024.

KHAN, F. S. A. et al. A comprehensive review on magnetic carbon nanotubes and carbon nanotube-based buckypaper for removal of heavy metals and dyes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 413, n. February, p. 125375, 2021.

KHAN, M. Y. A.; GANI, K. M.; CHAKRAPANI, G. J. Spatial and temporal variations of physicochemical and heavy metal pollution in Ramganga River—a tributary of River Ganges, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 5, 1 mar. 2017.

KHARRAZI, S. M. et al. Pretreatment of lignocellulosic waste as a precursor for synthesis of high porous activated carbon and its application for Pb (II) and Cr (VI) adsorption from aqueous solutions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 180, p. 299–310, 2021.

KHOONI, M. A. K.; AHMADZADEH, H.; DAVARDOOSTMANESH, M. Magnetic graphene oxide/Mg-Al layered double hydroxide nanocomposite as an efficient adsorbent for removal of methylene blue: A study of equilibrium isotherms, kinetics, thermodynamic and reusability. **Materials Science and Engineering: B**, v. 300, p. 117123, 1 fev. 2024.

KHOSHBOUY, R.; TAKAHASHI, F.; YOSHIKAWA, K. Preparation of high surface area sludge-based activated hydrochar via hydrothermal carbonization and application in the removal of basic dye. **Environmental Research**, v. 175, n. April, p. 457–467, 2019.

KOLAROVA, N.; NAPIÓRKOWSKI, P. Trace elements in aquatic environment. Origin, distribution, assessment and toxicity effect for the aquatic biota. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 21, n. 4, p. 655–668, 1 out. 2021.

KONTOGEORGIS, G. M.; MARIBO-MOGENSEN, B.; THOMSEN, K. The Debye-Hückel theory and its importance in modeling electrolyte solutions. **Fluid Phase Equilibria**, v. 462, p. 130–152, 25 abr. 2018.

KOTHAHALE, V. P. et al. Carboxyl and thiol-functionalized magnetic nanoadsorbents for efficient and simultaneous removal of Pb(II), Cd(II), and Ni(II) heavy metal ions from aqueous solutions: Studies of adsorption, kinetics, and isotherms. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 172, p. 111089, 1 jan. 2023.

KRAHNSTÖVER, T.; PLATTNER, J.; WINTGENS, T. Quantitative detection of powdered activated carbon in wastewater treatment plant effluent by thermogravimetric analysis (TGA). **Water Research**, v. 101, p. 510–518, 15 set. 2016.

KÜÇÜK, M. E. et al. Simultaneous adsorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) from synthetic wastewater using NaP and LTA zeolites prepared from biomass fly ash. **Heliyon**, v. 9, n. 10, p. e20253, 1 out. 2023.

KUMAR, A. et al. Multivariable modeling, optimization and experimental study of Cr(VI) removal from aqueous solution using peanut shell biochar. **Environmental Research**, v. 215, p. 114287, 1 dez. 2022.

KUMAR, N. et al. **A review on sustainable mesoporous activated carbon as adsorbent for efficient removal of hazardous dyes from industrial wastewater.** **Journal of Water Process Engineering** Elsevier Ltd, , 1 ago. 2023.

LARANJA, M. J. et al. Semivolatile organic compounds in the products from hydrothermal carbonisation of sugar cane bagasse and vinasse by gas chromatography-mass spectrometry. **Bioresource Technology Reports**, v. 12, 1 dez. 2020.

LARANJA, M. J. et al. Valorisation of sugar cane bagasse using hydrothermal carbonisation in the preparation of magnetic carbon nanocomposite in a single-step synthesis applied to chromium adsorption. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 97, n. 8, p. 2032–2046, 2022.

LENG, L. et al. Biochar stability assessment methods: A review. **Science of the Total Environment**, v. 647, p. 210–222, 2019.

LI, H. et al. Adsorption of lead ions by magnetic carbon: Comparison of magnetic carbon properties and modification methods. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 3, 1 jun. 2023.

LI, R.; WANG, L.; SHAHBAZI, A. A Review of Hydrothermal Carbonization of Carbohydrates for Carbon Spheres Preparation. **Trends in Renewable Energy**, v. 1, n. 1, p. 43–56, 15 mar. 2015.

LI, W. TAO et al. Preparation of nitrogen-doped activated carbon from bio-oil residue for efficient CO₂ adsorption. **Industrial Crops and Products**, v. 210, 1 abr. 2024.

LIMA, E. C. et al. A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoof equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. **Journal of Molecular Liquids**, v. 273, p. 425–434, 1 jan. 2019.

LIU, T. H. Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation. **Chemical Engineering Journal**, v. 158, n. 2, p. 129–142, 1 abr. 2010.

LIU, C. et al. Biochars and modified-biochars for toxic-metal/metalloid ions sorption in various mixed solution systems: A review on kinetic and isotherm models. **Desalination and Water Treatment**, v. 319, p. 100404, 1 jul. 2024.

LIU, J.; CHI, Y.; SHU, D. Effects of process parameters on hydrothermal carbonization of cellulose. **Huagong Xuebao/CIESC Journal**, v. 66, n. 12, p. 4980–4987, 2015.

LIU, X. et al. Multicomponent adsorption of heavy metals onto biogenic hydroxyapatite: Surface functional groups and inorganic mineral facilitating stable adsorption of Pb(II). **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, p. 130167, 5 fev. 2023a.

LIU, X. et al. Multicomponent adsorption of heavy metals onto biogenic hydroxyapatite: Surface functional groups and inorganic mineral facilitating stable adsorption of Pb(II). **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, p. 130167, 5 fev. 2023b.

LOH, Y. R. et al. Sugarcane bagasse—The future composite material: A literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 75, p. 14–22, 1 jun. 2013.

LOPES, L. C.; HUSMANN, S.; ZARBIN, A. J. G. Chemically synthesized graphene as a precursor to Prussian blue-based nanocomposite: A multifunctional material for transparent aqueous K-ion battery or electrochromic device. **Electrochimica Acta**, v. 345, p. 136199, 10 jun. 2020.

MACKEY, E. A. et al. **Certification of Three NIST Renewal Soil Standard Reference Materials for Element Content: SRM 2709a San Joaquin Soil, SRM 2710a Montana Soil I, and SRM 2711a Montana Soil II.** [s.l: s.n.].

MAFTOUH, A. et al. **Comparative Review of Different Adsorption Techniques Used in Heavy Metals Removal in Water.** **Biointerface Research in Applied Chemistry** AMG Transcend Association, , 15 ago. 2023.

MAGHSOODI GOUSHKI, F.; REZA ISLAMI, M.; NEJADSHAFIEE, V. Preparation of eco-friendly nanocomposites based on immobilization of magnetic activated carbon with tartaric acid: Application for adsorption of heavy metals and evaluation of their catalytic activity in C-C coupling reaction. **Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology**, v. 277, n. November 2021, p. 115591, 2022.

MEI, Y.; ZHUANG, S.; WANG, J. Adsorption of heavy metals by biochar in aqueous solution: A review. **Science of The Total Environment**, v. 968, p. 178898, 10 mar. 2025.

MÉNDEZ-ARMENTA, M.; RÍOS, C. **Cadmium neurotoxicity.** **Environmental Toxicology and Pharmacology**, maio 2007.

MENSAH, K. et al. Novel nano-ferromagnetic activated graphene adsorbent extracted from waste for dye decolonization. **Journal of Water Process Engineering**, v. 45, n. November 2021, p. 102512, 2022.

MI, Y. et al. Ultra-high Specific Surface Area Activated Carbon from Taihu Cyanobacteria via KOH Activation for Enhanced Methylene Blue Adsorption. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, dez. 2023.

MOTHÉ, C. G.; DE MIRANDA, I. C. Characterization of sugarcane and coconut fibers by thermal analysis and FTIR. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 97, n. 2, p. 661–665, ago. 2009.

MUNEEB UR RAHMAN KHATTAK, M. et al. Removal of Heavy Metals from Drinking Water by Magnetic Carbon Nanostructures Prepared from Biomass. **Journal of Nanomaterials**, v. 2017, 2017.

NICHOLSON, F. A. et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. **Science of The Total Environment**, v. 311, n. 1–3, p. 205–219, 20 jul. 2003.

NIZAMUDDIN, S. et al. An overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, n. December 2016, p. 1289–1299, 2017.

NOGUEIRA, G. A. et al. Magnetic activated carbonaceous materials from sugarcane bagasse: Preparation, characterization, and hexavalent chromium removal. **Materials Today Sustainability**, v. 28, p. 101040, dez. 2024.

OICKLE, A. M. et al. Standardization of the Boehm titration: Part II. Method of agitation, effect of filtering and dilute titrant. **Carbon**, v. 48, n. 12, p. 3313–3322, 1 out. 2010.

OLUSEGUN, S. J. et al. Iron-based materials for the adsorption and photocatalytic degradation of pharmaceutical drugs: A comprehensive review of the mechanism pathway. **Journal of Water Process Engineering**, v. 51, n. June 2022, p. 103457, 2023.

PAN, T. et al. Hydrothermal carbonization of biomass waste and application of produced hydrochar in organic pollutants removal. **Journal of Cleaner Production**, v. 457, 10 jun. 2024.

PAP, S. et al. Evaluation of the adsorption potential of eco-friendly activated carbon prepared from cherry kernels for the removal of Pb²⁺, Cd²⁺ and Ni²⁺ from aqueous wastes. **Journal of Environmental Management**, v. 184, p. 297–306, 15 dez. 2016.

PATHAK, H. K. et al. Recent advancement of nano-biochar for the remediation of heavy metals and emerging contaminants: Mechanism, adsorption kinetic model, plant growth and development. **Environmental Research**, v. 255, p. 119136, 15 ago. 2024.

PAULINO, R. et al. Critical review of adsorption and biodegradation mechanisms for removal of biogenic taste and odour compounds in granular and biological activated carbon contactors. **Journal of Water Process Engineering**, v. 52, p. 103518, 1 abr. 2023.

PAYEL, S.; HASHEM, M. A.; HASAN, M. A. Recycling biochar derived from tannery liming sludge for chromium adsorption in static and dynamic conditions. **Environmental Technology and Innovation**, v. 24, 1 nov. 2021.

PENG, X. et al. Sustainable triethylenetetramine modified sulfonated graphene oxide/chitosan composite for enhanced adsorption of Pb(II), Cd(II), and Ni(II) ions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 261, p. 129741, 1 mar. 2024a.

PENG, X. et al. Sustainable triethylenetetramine modified sulfonated graphene oxide/chitosan composite for enhanced adsorption of Pb(II), Cd(II), and Ni(II) ions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 261, p. 129741, 1 mar. 2024b.

PRASANAMEDHA, G.; SENTHIL KUMAR, P.; SHANKAR, V. Facile route for synthesis of Fe₀/Fe₃C/ γ -Fe₂O₃ carbon composite using hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse and its use as effective adsorbent for sulfamethoxazole removal. **Chemosphere**, v. 289, p. 133214, 1 fev. 2022.

PRIYADARSHANEE, M.; DAS, S. Multifaceted response surface methodology unravels competitive heavy metal adsorption affinity of immobilized biosorbent formulated from bacterial extracellular polymer of *Pseudomonas aeruginosa* OMCS-1. **Chemosphere**, v. 368, p. 143681, 1 nov. 2024.

PROHASKA, T. et al. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 94, n. 5, p. 573–600, 1 maio 2022.

QIU, B. et al. Cellulose derived magnetic mesoporous carbon nanocomposites with enhanced hexavalent chromium removal. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 2, n. 41, p. 17454–17462, 2014.

QU, J. et al. Multi-component adsorption of Pb(II), Cd(II) and Ni(II) onto microwave-functionalized cellulose: Kinetics, isotherms, thermodynamics, mechanisms and application for electroplating wastewater purification. **Journal of Hazardous Materials**, v. 387, p. 121718, 5 abr. 2020.

RAJ, V.; CHAUHAN, M. S.; PAL, S. L. Potential of sugarcane bagasse in remediation of heavy metals: A review. **Chemosphere**, v. 307, p. 135825, 1 nov. 2022.

RATTANACHUESKUL, N. et al. Magnetic carbon composites with a hierarchical structure for adsorption of tetracycline, prepared from sugarcane bagasse via hydrothermal carbonization coupled with simple heat treatment process. **Bioresource Technology**, v. 226, p. 164–172, 1 fev. 2017.

RAYMUNDO-PIÑERO, E. et al. KOH and NaOH activation mechanisms of multiwalled carbon nanotubes with different structural organisation. **Carbon**, v. 43, n. 4, p. 786–795, 1 jan. 2005.

RENU, K. et al. Molecular mechanism of heavy metals (Lead, Chromium, Arsenic, Mercury, Nickel and Cadmium) - induced hepatotoxicity – A review. **Chemosphere**, v. 271, p. 129735, 1 maio 2021.

RIBEIRO, F. C. P. et al. Sustainable catalysts for esterification: Sulfonated carbon spheres from biomass waste using hydrothermal carbonization. **Renewable Energy**, v. 220, 1 jan. 2024.

RIZWAN, M.; USMAN, K.; ALSAFRAN, M. **Ecological impacts and potential hazards of nickel on soil microbes, plants, and human health**. **ChemosphereElsevier Ltd**, , 1 jun. 2024.

RUCKART, P. Z. et al. **Morbidity and Mortality Weekly Report Update of the Blood Lead Reference Value-United States, 2021**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/nceh/lead/faqs/lead-faqs>>.

SAHMOUNE, M. N. **Evaluation of thermodynamic parameters for adsorption of heavy metals by green adsorbents**. **Environmental Chemistry Letters** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 15 jun. 2019a.

SAHMOUNE, M. N. **Evaluation of thermodynamic parameters for adsorption of heavy metals by green adsorbents.** *Environmental Chemistry Letters* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 15 jun. 2019b.

SAHU, M. K. et al. Equilibrium and kinetic studies of Cd(II) ion adsorption from aqueous solution by activated red mud. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 30, p. 14251–14265, 1 jun. 2016.

SAINT-EXUPÉRY, A. DE. **O Pequeno Príncipe.** 1943.

SALAME, I. I.; BANDOSZ, T. J. Surface Chemistry of Activated Carbons: Combining the Results of Temperature-Programmed Desorption, Boehm, and Potentiometric Titrations. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 240, n. 1, p. 252–258, 1 ago. 2001.

SALVESTRINI, S.; AMBROSONE, L.; KOPINKE, F. D. Some mistakes and misinterpretations in the analysis of thermodynamic adsorption data. **Journal of Molecular Liquids**, v. 352, p. 118762, 15 abr. 2022.

SAMPSON, M. M. et al. **Single-cell investigation of lead toxicity from neurodevelopment to neurodegeneration: Current review and future opportunities.** *Current Opinion in Toxicology* Elsevier B.V., , 1 jun. 2024.

SAMYN, L. M. et al. High-performance flexible supercapacitors based on potassium nickel(ii) hexacyanoferrates(iii) nanoparticles on carbon cloth as an electrode material. **Materials Advances**, v. 4, n. 16, p. 3654–3661, 1 ago. 2023.

SCHNEIDER, L. T. et al. Soybean hulls activated carbon for metronidazole adsorption: Thermochemical conditions optimization for tailored and enhanced meso/microporosity. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 177, 1 jan. 2024.

SCHÖNHERR, J. et al. Boehm Titration Revisited (Part I): Practical Aspects for Achieving a High Precision in Quantifying Oxygen-Containing Surface Groups on Carbon Materials. **C**, v. 4, n. 2, p. 21, 2018.

SELVARAJ, R. et al. Adsorptive removal of tetracycline from aqueous solutions using magnetic Fe₂O₃ / activated carbon prepared from *Cynometra ramiflora* fruit waste. **Chemosphere**, v. 310, p. 136892, 1 jan. 2023.

SERVICES, H. Toxicological Profile for Chromium. **ATSDR's Toxicological Profiles**, n. September, 2002.

SEVILLA, M.; FERRERO, G. A.; FUERTES, A. B. Beyond KOH activation for the synthesis of superactivated carbons from hydrochar. **Carbon**, v. 114, p. 50–58, 2017.

SHARMA, P. et al. Review on recent advancement of adsorption potential of sugarcane bagasse biochar in wastewater treatment. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 206, p. 428–439, 1 jun. 2024.

SHARMA, R. et al. Current scenario of heavy metal contamination in water. **Contamination of Water: Health Risk Assessment and Treatment Strategies**, p. 49–64, 1 jan. 2021.

SHARMA, S. K.; PETRUSEVSKI, B.; AMY, G. Chromium removal from water: A review. **Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA**, v. 57, n. 8, p. 541–553, 2008.

SIDDIQUI, M. T. H. et al. Synthesis of magnetic carbon nanocomposites by hydrothermal carbonization and pyrolysis. **Environmental Chemistry Letters**, v. 16, n. 3, p. 821–844, 2018.

SIDDIQUI, M. T. H. et al. Fabrication of advance magnetic carbon nano-materials and their potential applications: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 1, 2019.

SILVA, C. C. et al. Effect of the reaction medium on the immobilization of nutrients in hydrochars obtained using sugarcane industry residues. **Bioresource Technology**, v. 237, p. 213–221, 1 ago. 2017.

SINGH RAWAT, S.; SHARMA, A. Sugarcane bagasse ash—The future composite material: A literature review. **Materials Today: Proceedings**, 10 ago. 2023.

SINHA, R. et al. Groundwater for Sustainable Development Single-step synthesis of activated magnetic biochar derived from rice husk for hexavalent chromium adsorption : Equilibrium mechanism , kinetics , and thermodynamics analysis. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 18, n. May, p. 100796, 2022.

SMITH, M.; KHATIWADA, R.; LI, P. Exploring Ion Polarizabilities and Their Correlation with van der Waals Radii: A Theoretical Investigation. **Journal of Chemical Theory and Computation**, v. 20, n. 19, p. 8505–8516, 8 out. 2024.

SOMYANONTHANAKUN, W. et al. Studies on the adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using sugarcane bagasse-based modified activated carbon with nitric acid: Kinetic, isotherm and desorption. **Chemical Physics Impact**, v. 6, p. 100181, 1 jun. 2023.

SUHAS et al. **Cellulose: A review as natural, modified and activated carbon adsorbent**. **Bioresource Technology** Elsevier Ltd, , 1 set. 2016.

SULTANA, M. et al. A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 6, p. 100382, 1 fev. 2022.

SUN, L. et al. An analysis of the parameters in the Debye-Hückel theory. **Fluid Phase Equilibria**, v. 556, p. 113398, 1 maio 2022.

SUN, M. et al. Effect of iron impregnation ratio on the properties and adsorption of KOH activated biochar for removal of tetracycline and heavy metals. **Bioresource Technology**, v. 380, 1 jul. 2023.

SUPRAJA, K. V. et al. **Critical review on production, characterization and applications of microalgal hydrochar: Insights on circular bioeconomy through hydrothermal carbonization**. **Chemical Engineering Journal** Elsevier B.V., , 1 out. 2023.

TARVIJI, H. et al. Comparison of contamination levels and health risks of toxic metals in raw and home-cooked rice; A field study on some rural households of Northern Iran. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 122, 1 set. 2023.

TEKIN, K.; KARAGÖZ, S.; BEKTAŞ, S. A review of hydrothermal biomass processing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 673–687, 2014.

THAKUR, A. K. et al. Green adsorbents for the removal of heavy metals from Wastewater: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, p. 1468–1472, 1 jan. 2022.

THINES, K. R. et al. Synthesis of magnetic biochar from agricultural waste biomass to enhancing route for waste water and polymer application: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 257–276, 1 jan. 2017.

THOMMES, M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9–10, p. 1051–1069, 1 out. 2015.

TOPARE, N. S.; WADGAONKAR, V. S. A review on application of low-cost adsorbents for heavy metals removal from wastewater. **Materials Today: Proceedings**, 6 set. 2022.

TRIPATHI, M. et al. Overview on synthesis of magnetic bio char from discarded agricultural biomass. **Handbook of Composites from Renewable Materials**, v. 1–8, n. May 2021, p. 435–460, 2017.

TSECHANSKY, L.; GRABER, E. R. **Methodological limitations to determining acidic groups at biochar surfaces via the Boehm titration**. CarbonElsevier Ltd, , 2014.

TUOMIKOSKI, S. et al. Multiple heavy metal removal simultaneously by a biomass-based porous carbon. **Water Environment Research**, v. 93, n. 8, p. 1303–1314, 2021.

UNGUREANU, N.; VLĂDUȚ, V.; BIRIȘ, S. ȘTEFAN. **Sustainable Valorization of Waste and By-Products from Sugarcane Processing**. Sustainability (Switzerland)MDPI, , 1 set. 2022.

VAHIDIPOUR, M.; RAEISI, E.; VAN DER ZEE, S. E. A. T. M. Potentially toxic metals in sediments, lake water and groundwater of the Ramsar wetlands Bakhtegan–Tashk, South Iran: Distribution and source assessment. **Environmental Technology & Innovation**, v. 28, p. 102789, 1 nov. 2022.

VANHOLME, R. et al. Lignin biosynthesis and structure. **Plant Physiology**, v. 153, n. 3, p. 895–905, 2010.

VAREDA, J. P. **On validity, physical meaning, mechanism insights and regression of adsorption kinetic models**. Journal of Molecular LiquidsElsevier B.V., , 15 abr. 2023.

VENKATA RAMANA, D. K.; YU, J. S.; SESHIAH, K. Silver nanoparticles deposited multiwalled carbon nanotubes for removal of Cu(II) and Cd(II) from water: Surface, kinetic,

equilibrium, and thermal adsorption properties. **Chemical Engineering Journal**, v. 223, p. 806–815, 1 maio 2013.

VIEIRA, L. H. S. et al. Strategic design of magnetic carbonaceous nanocomposites and its application as multifunctional adsorbent. **Carbon**, v. 161, p. 758–771, 2020.

VILAPLANA-ORTEGO, E. et al. Comparative study of the micropore development on physical activation of carbon fibers from coal tar and petroleum pitches. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 112, n. 1–3, p. 125–132, 1 jul. 2008.

VOORA, V. et al. **Sugar cane prices and sustainability SUSTAINABLE COMMODITIES MARKETPLACE SERIES Market Overview**. [s.l: s.n.].

WAN MAHARI, W. A. et al. Progress in valorisation of agriculture, aquaculture and shellfish biomass into biochemicals and biomaterials towards sustainable bioeconomy. **Chemosphere**, v. 291, p. 133036, 1 mar. 2022.

WANG, J.; GUO, X. **Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods**. **Journal of Hazardous Materials Elsevier B.V.**, , 15 maio 2020a.

WANG, J.; GUO, X. Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. **Chemosphere**, v. 258, p. 127279, 1 nov. 2020b.

WANG, L.; CHANG, Y.; LI, A. Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108, p. 423–440, 1 jul. 2019.

WANG, T. et al. A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, n. February, p. 223–247, 2018.

WANG, X. et al. Advances in the preparation and biological applications of core@shell nanocrystals based on quantum dots and noble metal. **RSC Advances**, v. 14, n. 36, p. 26308–26324, 16 ago. 2024.

WONG, S. et al. Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: A short review. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 361–375, 2018.

WU, C. H.; KUO, C. Y.; GUAN, S. S. Adsorption of heavy metals from aqueous solutions by waste coffee residues: kinetics, equilibrium, and thermodynamics. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 11, p. 5056–5064, 1 mar. 2016.

WU, H. et al. Magnetic coupling in cm-scale buckypapers of self-organized Fe/Fe₃C-filled carbon nano-onions: A controlled chemical vapour deposition approach. **Diamond and Related Materials**, v. 130, 1 dez. 2022.

XIN, W.; SONG, Y. **Mesoporous carbons: recent advances in synthesis and typical applications**. **RSC Advances Royal Society of Chemistry**, , 11 set. 2015.

YANG, K. et al. Preparation of high surface area activated carbon from coconut shells using microwave heating. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 15, p. 6163–6169, 1 ago. 2010.

YAO, X. et al. Magnetic activated biochar nanocomposites derived from wakame and its application in methylene blue adsorption. **Bioresource Technology**, v. 302, n. November 2019, p. 122842, 2020.

YE, X. et al. Porous carbon nanotube microspheres with tailorable surface wettability areas for oil adsorption. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 604, p. 737–745, 15 dez. 2021.

YOUNAS, F. et al. **Current and emerging adsorbent technologies for wastewater treatment: Trends, limitations, and environmental implications**. **Water (Switzerland)**MDPI AG, , 2 jan. 2021.

YU, X. et al. KOH-activated hydrochar with engineered porosity as sustainable adsorbent for volatile organic compounds. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 588, n. December 2019, p. 124372, 2020.

ZADEH, K. K.; JAFARI, D. Activated carbon/alginate/Fe₃O₄ magnetic nanocomposite as a superior functional material for removal of lead from aqueous media. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2023.

ZHANG, H. et al. Magnetic porous carbon microspheres synthesized by simultaneous activation and magnetization for removing methylene blue. **Journal of Porous Materials**, v. 24, n. 2, p. 341–353, 2017.

ZHANG, P. et al. A green biochar/iron oxide composite for methylene blue removal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 384, n. September 2019, p. 121286, 2020.

ZHANG, X.; ZHANG, L.; LI, A. Eucalyptus sawdust derived biochar generated by combining the hydrothermal carbonization and low concentration KOH modification for hexavalent chromium removal. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 989–998, 2018.

ZHANG, Y. et al. Contamination and eco-risk assessment of toxic trace elements in lakebed surface sediments of Lake Yangzong, southwestern China. **Science of The Total Environment**, v. 843, p. 157031, 15 out. 2022.

ZHOU, L. et al. Efficient removal of hexavalent chromium through adsorption-reduction-adsorption pathway by iron-clay biochar composite prepared from *Populus nigra*. **Separation and Purification Technology**, v. 285, n. October 2021, 2022.

ZHU, R. et al. Synthesis of magnetic activated carbons from black liquor lignin and Fenton sludge in a one-step pyrolysis for methylene blue adsorption. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106538, 2021.

ZHU, X. et al. Environmental performances of hydrochar-derived magnetic carbon composite affected by its carbonaceous precursor. **RSC Advances**, v. 5, n. 75, p. 60713–60722, 2015.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	GABRIELA APARECIDA NOGUEIRA 18 de outubro de 2001
Nacionalidade	Brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Nogueira, Gabriela A. Nogueira, G.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/9096410577087692
ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0878-6162
MyResearcherID	http://www.webofscience.com/wos/author/record/ABA-6369-2022
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2019/2023	Bacharelado em Química Ambiental Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de São José do Rio Preto.
2023/2025	Mestrado em Química Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de São José do Rio Preto.
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
<p>Nogueira, Gabriela A. et al. Magnetic activated carbonaceous materials from sugarcane bagasse: Preparation, characterization, and hexavalent chromium removal. <i>Materials Today Sustainability</i>. v. 28, 2024. DOI: 10.1016/j.mtsust.2024.101040.</p> <p>Nogueira, Gabriela A. et al. Valorization of sugarcane bagasse in production of sustainable activated magnetic carbonaceous materials for interaction study with cationic dye. 2023. 21st International Humic Substances Conference. (Apresentação de Trabalho/Congresso).</p> <p>Nogueira, Gabriela A. et al. Reaproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar como precursor de carbono na síntese de um adsorvente magnético por meio da carbonização hidrotérmica. 2021. XVIII Semana de Química de V Congresso de Química do Noroeste Paulista (Apresentação de Trabalho/Congresso).</p> <p>Nogueira, Gabriela A. et al. Produção de Carvão Magnético Ativado para Remoção de Azul de Metileno. 2021. XXXIII CIC UNESP – 2ª Fase. (Apresentação de Trabalho/Congresso).</p> <p>Laranja, Márcio J.; Soares Júnior, Francisco H.; Nogueira, Gabriela A. et al. Valorisation of sugar cane bagasse using hydrothermal carbonisation in the preparation of magnetic carbon nanocomposite in a single-step synthesis applied to chromium adsorption. <i>J. Chem. Technol. Biotechnol.</i> v. 97, p. 2032-2046. 2022. (Artigo científico).</p>	

Bisinoti, Márcia C. **Nogueira, Gabriela A.** et al. Carvões magnéticos derivados do bagaço de cana-de-açúcar para adsorção de poluentes. 2024. X ENQAmb. (Apresentação de Trabalho/Congresso).

PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES

Coorientações

Souza, Tais A. Estudo de adsorção em ciclos de azul de metileno e azul reativo-19 por carvão magnético ativado. São José do Rio Preto-SP. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de São José do Rio Preto; 2024-2025.

Pereira, Lorena S. Efeito da ativação termoquímica com KOH nas propriedades termodinâmicas de adsorção dos corantes azul de metileno e azul reativo-19. São José do Rio Preto-SP. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de São José do Rio Preto; 2024-2025.

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

XVI Semana de Química da UNESP de São José do Rio Preto e III Congresso de Química do Noroeste Paulista. Carga Horária: 40 h. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – UNESP/IBILCE, Brasil. 2019.

1º Encontro Internacional de Metrologia e Examinologia em Química online (1º eMEQ). Carga Horária: 8 h. 2020.

I Congresso Online Nacional de Ensino de Química, Física, Biologia e Matemática (I CONEQFBM). Carga Horária: 30 h. Brasil. 2020.

1º Congresso Online Nacional de Química Analítica e Ambiental (1º CONQUIAMB). Carga Horária: 25 h. Brasil, 2020.

Comissão Organizadora da “II Escola de Química Ambiental da UNESP de São José do Rio Preto”. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – UNESP/IBILCE, Brasil. 2020.

XVII Semana de Química da UNESP de São José do Rio Preto e IV Congresso de Química do Noroeste Paulista. Carga Horária: 15 h. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – UNESP/IBILCE, Brasil. 2020.

V Semana do Meio Ambiente. Carga Horária: 8 h. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – UNESP/IBILCE, Brasil. 2021.

Ganhou o prêmio de viagem para a “21st International Humic Substances Conference” oferecido pela International Humic Substances Society. 2023.

Participação do X Encontro Nacional de Química Ambiental (X ENQAmb) por meio do pôster intitulado “Carvões magnéticos derivados do bagaço de cana-de-açúcar para adsorção de poluentes” apresentado pela Profª Drª Márcia Cristina Bisinoti. 2024.

Participação do XXXVI Congresso de Iniciação Científica da UNESP (XXXVI CIC) por meio do pôster intitulado “Carvão magnético ativado termoquimicamente com KOH para remoção de corante R-19” apresentado pela Tais Alixandre de Souza. 2024.

Participação do XXXVI Congresso de Iniciação Científica da UNESP (XXXVI CIC) por meio do pôster intitulado “Efeito da ativação termoquímica com KOH na concentração de ferro e potássio em carvões magnéticos” apresentado pela Lorena Severino Pereira. 2024.

Participou como ouvinte do evento “Sustenta & Habilidade – Ações e Inovações em Química em Busca dos ODS” no Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – IBILCE/UNESP. 2024. Carga horária total de 16 horas.