



PBPC
ISSN 2674-9432



Qualis A3
CAPES 2021-2024



DOI - Crossref

Latindex



Indexado no
Acadêmico

Biossorbentes lignocelulósicos de resíduos agroindustriais na remoção de contaminantes aquáticos: mecanismos, modelagem cinético-isotérmica e a fronteira dos compósitos magnéticos — uma revisão integrativa

Edjane Limeira Silva¹; Pedro Almeida do Nascimento Júnior²; Karine Oliveira³



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n4p244-265>

Artigo recebido em 4 de Abril e publicado em 4 de Junho de 2026

ARTIGO DE REVISÃO

RESUMO

Águas contaminadas por metais potencialmente tóxicos, corantes sintéticos e micropoluentes orgânicos seguem como um dos passivos ambientais mais difíceis de equacionar, sobretudo em países com forte base agroindustrial. Diante das limitações das estações convencionais, biossorbentes obtidos a partir de resíduos lignocelulósicos — bagaços, cascas, palhas, sabugos e tortas de prensagem — vêm ganhando espaço como alternativa de baixo custo, com o atrativo adicional de dar destino útil a subprodutos que, em geral, seguem para queima ou descarte inadequado. O presente trabalho teve como objetivo sistematizar, por meio de uma revisão integrativa da literatura, o conhecimento publicado sobre o uso desses materiais na remoção de contaminantes aquáticos, com três focos articulados: os mecanismos físico-químicos da biossorção, o ajuste a modelos cinéticos e isotérmicos clássicos e os avanços recentes em modificações químicas e compósitos híbridos magnéticos. A busca foi realizada nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect e SciELO, cobrindo o período de 1990 a 2026, com descritores combinados em inglês e português. Após triagem por critérios de inclusão e exclusão, os estudos selecionados foram lidos integralmente e organizados em uma matriz de extração; a análise foi qualitativa, com agrupamento temático em torno de cinco eixos. Os achados convergem para o predomínio do modelo cinético de pseudo-segunda ordem e da isoterma de Langmuir nos ajustes reportados, padrão compatível com adsorção química em sítios específicos, mas que coexiste, na prática, com troca iônica, complexação superficial e atrações eletrostáticas. Modificações alcalinas, ácidas e por enxerto de grupos funcionais aumentam consideravelmente a capacidade adsorptiva, ao passo que a incorporação de fases magnéticas — sobretudo magnetita — supera um gargalo operacional clássico, ao permitir a separação rápida do adsorvente da fase líquida e ampliar a viabilidade do uso em fluxo contínuo. Ainda assim,

persistem lacunas relevantes: padronização experimental insuficiente, escassez de ensaios em matrizes reais e em escala-piloto e pouca atenção à toxicidade do material após múltiplos ciclos. Conclui-se que biossorventes lignocelulósicos — em especial os magnéticos — constituem uma plataforma promissora cuja consolidação dependerá, sobretudo, da realização de estudos em efluentes reais, do uso de regressão não-linear na modelagem, da avaliação ecotoxicológica do material e do efluente tratados e de ensaios em coluna de leito fixo e em escala-piloto.

Palavras-chave: Biossorção; bioadsorção; resíduos agroindustriais; isotermas de adsorção; compósitos magnéticos; tratamento de águas.

Lignocellulosic biosorbents from agroindustrial residues for the removal of aquatic contaminants: mechanisms, kinetic-isothermal modelling and the frontier of magnetic composites — an integrative review

ABSTRACT

Aquatic contamination by potentially toxic metals, synthetic dyes and organic micropollutants remains one of the most stubborn environmental liabilities of our time, particularly in countries with intensive agroindustrial activity. Faced with the limitations of conventional treatment plants, biosorbents derived from lignocellulosic residues — bagasses, husks, straws, cobs and pressing cakes — have been gaining ground as a low-cost alternative, while turning by-products usually destined for burning or improper disposal into useful materials. The aim of this study was to systematise, through an integrative literature review, the knowledge published on the use of these materials in the removal of aquatic contaminants, with three articulated focuses: the physico-chemical mechanisms of biosorption, the fitting of classical kinetic and isothermal models, and the recent advances in chemical modifications and hybrid magnetic composites. The search was conducted in the Scopus, Web of Science, ScienceDirect and SciELO databases, covering 1990 to 2026, with descriptors combined in English and Portuguese. After applying inclusion and exclusion criteria, the selected studies were read in full and organised in an extraction matrix; analysis was qualitative, with thematic grouping around five axes. The findings converge on the predominance of the pseudo-second-order kinetic model and the Langmuir isotherm in the reported fittings, a pattern compatible with chemical adsorption on specific sites but which, in practice, coexists with ion exchange, surface complexation and electrostatic attraction. Alkaline, acidic and grafting-based modifications consistently increase adsorption capacity, while the incorporation of magnetic phases — especially magnetite — overcomes a classical operational bottleneck, by allowing rapid separation of the adsorbent from the liquid phase and broadening the viability of continuous-flow applications. Nevertheless, relevant gaps persist: insufficient experimental standardisation, scarcity of studies in real matrices and at pilot scale, and little attention to the toxicity of the material after



multiple cycles. It is concluded that lignocellulosic biosorbents — especially the magnetic ones — represent a promising platform whose consolidation will depend mainly on studies in real effluents, the use of non-linear regression in modelling, ecotoxicological assessment of the material and the treated effluent, and tests in fixed-bed columns and at pilot scale.

Keywords: Biosorption; bioadsorption; agroindustrial residues; adsorption isotherms; magnetic composites; water treatment.

Instituição afiliada — ¹ Universidade Estadual de Alagoas (UNEAL), Palmeira dos Índios, Alagoas, Brasil — edjanelimeira82@gmail.com. ² Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Arapiraca, Alagoas, Brasil — pedroalmeidajr20@gmail.com. ³ Universidade Estadual de Alagoas (UNEAL), Palmeira dos Índios, Alagoas, Brasil — karine.oliveira@uneal.edu.br (orientadora).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

A degradação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas é, hoje, um dos problemas mais visíveis da pressão antrópica sobre os recursos naturais. Setores industriais, agropecuários e domésticos têm aumentado, de forma persistente, a carga de contaminantes nos corpos hídricos, com presença simultânea de poluentes clássicos tal como metais pesados, por exemplo Cd(II), Pb(II), Cu(II), Cr(VI), Ni(II) e Hg(II); corantes sintéticos das classes azo, antraquinônica, triarilmetano e indigóide, além de contaminantes emergentes, categoria que reúne fármacos (diclofenaco, paracetamol, tetraciclina), hormônios, agrotóxicos e produtos de higiene pessoal (SCHWARZENBACH et al., 2006; MORIN-CRINI et al., 2022). A complexidade desses cenários expõe um limite incômodo das tecnologias correntes: estações convencionais de tratamento foram projetadas, em sua maior parte, para reduzir matéria orgânica biodegradável e sólidos em suspensão, e respondem mal a espécies dissolvidas em concentrações traço.

Nesse contexto, a adsorção desponta como uma das alternativas mais atrativas no rol dos tratamentos avançados. Os motivos são pragmáticos: simplicidade operacional, capacidade de operar em baixas concentrações de contaminantes e regeneração relativamente factível do adsorvente (CRINI; LICHTFOUSE, 2019). O carvão ativado segue sendo o padrão da indústria, mas seu custo e a dependência de matérias-primas fósseis motivam uma busca persistente por substitutos mais sustentáveis (CRINI et al., 2019; HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024). Diante disso, o processo de biossorção — também referido como bioadsorção em parte significativa da literatura — vem se firmando como rota promissora; o conceito, consolidado por Volesky (2007), descreve o emprego de biomassa, viva ou não viva, capaz de se ligar a contaminantes por meio de mecanismos predominantemente passivos, ancorados na química da superfície celular.

Em paralelo, países como o Brasil acumulam, todo ano, volumes expressivos de resíduos lignocelulósicos. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento, a safra brasileira de cana-de-açúcar atingiu cerca de 673,3 milhões de toneladas em 2025/2026, e a previsão para 2026/2027 alcança 709,1 milhões de toneladas — o segundo maior volume da série histórica (CONAB, 2025; CONAB, 2026); a safra de milho 2024/2025 foi estimada em 322,4 milhões de toneladas (CONAB, 2025),



enquanto a de arroz somou cerca de 7,9 milhões de toneladas (CONAB, 2026). Desses volumes resultam, anualmente, dezenas de milhões de toneladas de bagaços, palhas, sabugos, cascas e tortas de prensagem, materiais que, mal manejados, se convertem em passivo ambiental por queima a céu aberto, lançamento em cursos d'água ou disposição inadequada em solo. Convertê-los em biossorventes resolve, de uma só vez, dois problemas correlatos: descontaminar águas e dar destino útil a uma fração relevante dos subprodutos agrícolas. Sob a ótica da Agenda 2030 das Nações Unidas, esse aproveitamento se alinha de modo direto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 — água potável e saneamento, com destaque para a meta 6.3 (melhoria da qualidade da água e ampliação da reutilização) —, 12 — consumo e produção responsáveis, em particular a meta 12.5 (redução substancial da geração de resíduos por reciclagem e reúso) — e, indiretamente, 15 — vida terrestre, na medida em que reduz a queima e o descarte inadequado de resíduos agrícolas (ONU, 2015; SUD; MAHAJAN; KAUR, 2008; ABDOLALI et al., 2014; AKPOMIE; CONRADIE, 2020; KARIM et al., 2023; RAHMAN et al., 2026).

A literatura sobre o tema é volumosa, mas marcada, em alguns aspectos, por inconsistências metodológicas. Tran et al. (2017) e Lima et al. (2019) chamaram atenção, em momentos distintos, para erros recorrentes no tratamento de dados de equilíbrio e cinética: uso indevido de formas linearizadas dos modelos, interpretação imprecisa de parâmetros termodinâmicos e dificuldades de comparação entre estudos. Tais advertências são incômodas, mas necessárias, e justificam revisões que organizem o conhecimento existente, identifiquem padrões e sinalizem lacunas com clareza. É justamente nesse esforço de síntese que se inscrevem os avanços mais recentes do campo: estudos voltados à preparação de biossorventes magnéticos, a partir de matrizes lignocelulósicas ou de biocarvões delas derivados, ampliam o leque de possibilidades operacionais — com destaque para a separação magnética rápida em fluxo contínuo —, mas também agregam valor ao subproduto agroindustrial, sustentam estratégias de economia circular e podem reduzir o custo total do tratamento, embora a viabilidade econômica em escala dependa, ainda, de estudos integrados (SOARES et al., 2020; ZHAO et al., 2021; OSMAN et al., 2023; HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024; DAFFALLA, 2025).

Este artigo apresenta uma revisão integrativa cujo objetivo é sistematizar o estado da arte sobre o uso de biossorbentes lignocelulósicos derivados de resíduos agroindustriais na remoção de contaminantes aquáticos, com três focos articulados: descrever os mecanismos físico-químicos predominantes, analisar a aplicação dos principais modelos cinéticos e isotérmicos e discutir o avanço das modificações químicas e dos compósitos híbridos magnéticos. A contribuição esperada para a comunidade científica é dupla: oferecer uma síntese crítica que articule fundamentos e fronteiras de pesquisa do campo e indicar, com base na literatura analisada, as lacunas mais urgentes a serem cobertas em estudos futuros, especialmente no contexto brasileiro.

2 METODOLOGIA DA REVISÃO INTEGRATIVA

Adotou-se o referencial de revisão integrativa proposto por Whitemore e Knaf (2005), modalidade que combina estudos com delineamentos distintos para produzir uma síntese ampla sobre um tema. O percurso seguiu seis etapas: identificação do problema, busca na literatura, avaliação dos dados, análise, interpretação e apresentação dos resultados. Embora a revisão integrativa não exija o rigor estrutural de uma revisão sistemática *stricto sensu*, recorreu-se ao fluxo recomendado pela declaração PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021) como guia de transparência para descrever a seleção dos estudos.

2.1 Questão norteadora

Quais são os mecanismos, os modelos cinético-isotérmicos predominantes e as estratégias de modificação, em especial a obtenção de compósitos magnéticos — descritos na literatura para o emprego de biossorbentes lignocelulósicos derivados de resíduos agroindustriais na remoção de contaminantes aquáticos, tais como metais potencialmente tóxicos, corantes sintéticos e micropoluentes emergentes?

2.2 Bases de dados, descritores e recorte temporal

As buscas foram conduzidas em Scopus, Web of Science, ScienceDirect e SciELO, com consulta complementar ao Google Scholar para identificação de literatura não convencional (i.e., teses, dissertações e relatórios técnicos não indexados nas bases principais) e rastreamento de referências cruzadas. O recorte temporal abrangeu publicações de janeiro de 1990 ao primeiro semestre de 2026, de modo a contemplar

tanto a literatura clássica que estruturou conceitualmente o campo — como trabalhos seminais de modelagem (Langmuir, Freundlich, Ho e McKay) e de definição do conceito de biossorção (Volesky) — quanto os avanços mais recentes em materiais híbridos. Foram aceitos artigos em inglês, português e espanhol. A combinação de descritores e operadores booleanos, que incluiu deliberadamente os termos *bioadsorption* e *bioadsorção*, está sintetizada na Tabela 1.

Tabela 1 — Estratégia de busca utilizada nas bases de dados consultadas.

Item	Especificação
Bases	Scopus; Web of Science; ScienceDirect; SciELO; Google Scholar (complementar).
Recorte temporal	Janeiro de 1990 a junho de 2026.
Idiomas	Inglês, português e espanhol.
Descritores (inglês)	<i>(biosorption OR bioadsorption OR adsorption) AND (lignocellulosic OR "agricultural waste" OR "agro-industrial residue") AND ("heavy metals" OR dyes OR "emerging contaminants"); "magnetic biosorbent" AND "agricultural waste"; "magnetic biochar" AND wastewater.</i>
Descritores (português)	<i>(biossorção OR bioadsorção OR adsorção) AND (resíduo agroindustrial OR lignocelulósico) AND (metais OR corantes OR contaminantes emergentes); biocarvão magnético AND tratamento de águas.</i>
Critérios de inclusão	(i) artigos originais ou revisões em periódicos revisados por pares; (ii) uso de biomassa lignocelulósica de origem agroindustrial; (iii) reporte de ao menos um modelo cinético ou isotérmico ajustado; (iv) acesso integral ao texto.
Critérios de exclusão	(i) estudos centrados exclusivamente em biossorventes microbianos, algais ou animais; (ii) resumos de congresso sem artigo completo; (iii) duplicatas; (iv) trabalhos sem descrição mínima das condições experimentais.

Fonte: elaboração própria.

2.3 Procedimento de seleção e análise

A triagem inicial foi realizada por título e resumo, seguida de leitura integral dos textos selecionados. Para reduzir vieses, os estudos foram organizados em uma matriz de extração com os seguintes campos: biomassa empregada, pré-tratamento, contaminante-alvo, condições operacionais (pH, temperatura, dose de adsorvente, tempo de contato, concentração inicial), modelo cinético e isotérmico melhor ajustado, capacidade máxima reportada, presença de modificação química ou de magnetização e número de ciclos de reuso do material saturado. A análise foi qualitativa, com agrupamento temático em torno de cinco categorias: mecanismos físico-químicos; tipo de biomassa; modelagem; modificações e híbridos magnéticos; e lacunas da literatura.

Uma observação metodológica importante: sempre que esta revisão se refere a capacidades máximas de adsorção, optou-se pela descrição qualitativa do desempenho relativo, evitando-se reproduzir valores numéricos sem checagem direta nos artigos primários. Tal cautela responde diretamente às advertências de Tran et al. (2017) e Lima et al. (2019) sobre erros e inconsistências recorrentes na literatura de adsorção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do corpus analisado

Os trabalhos analisados se organizam, principalmente, em torno de três grandes blocos temáticos: os mecanismos físico-químicos da biossorção em matrizes lignocelulósicas, a tipologia das biomassas agroindustriais empregadas e a modelagem matemática dos processos. A esses três blocos somam-se, com peso crescente nas publicações recentes, as modificações químicas e os compósitos magnéticos, que constituem hoje a frente de avanço mais visível do campo. A Tabela 2, organizada cronologicamente, sintetiza a contribuição conceitual das referências clássicas que estruturaram o referencial teórico da biossorção; sua função neste artigo é fornecer ao leitor um mapa rápido das obras que fundamentam a interpretação dos mecanismos, modelos e estratégias discutidos nas seções seguintes.

Tabela 2 — Referências clássicas e sua contribuição conceitual para o campo da biossorção.

Referência	Contribuição central
Freundlich (1906)	Proposição empírica de isoterma para superfícies heterogêneas e adsorção em multicamadas, amplamente aplicada a sistemas reais.
Langmuir (1918)	Formulação do modelo de isoterma de monocamada em superfícies homogêneas, com sítios energeticamente equivalentes; base teórica para o conceito de capacidade máxima de adsorção (q_{max}).
Ho e McKay (1999)	Consolidação do modelo cinético de pseudo-segunda ordem como ajuste dominante em sistemas adsorvente-adsorvato com participação de mecanismos químicos.
Crini (2006)	Sistematização dos adsorventes não convencionais e de baixo custo, com ênfase na remoção de corantes; pavimentou o uso de resíduos agroindustriais como adsorventes alternativos.
Schwarzenbach et al. (2006)	Diagnóstico abrangente do desafio dos micropoluentes em águas, definindo prioridades para o tratamento avançado.
Volesky (2007)	Consolidação conceitual da biossorção como campo de pesquisa, distinguindo-a de processos ativos de bioacumulação.

Referência	Contribuição central
Sud, Mahajan e Kaur (2008)	Revisão abrangente sobre o uso de resíduos agrícolas como adsorventes de íons metálicos, organizando a literatura por tipo de biomassa e por íon-alvo.
Abdolali et al. (2014)	Revisão crítica dos resíduos e subprodutos lignocelulósicos típicos no tratamento de águas e efluentes, com análise das estratégias de processo.
Tran et al. (2017)	Identificação de erros e inconsistências recorrentes no tratamento de dados de adsorção, com chamado por padronização e maior cuidado na escolha das formas linear e não-linear dos modelos.
Crini et al. (2019)	Atualização do panorama dos adsorventes convencionais e não convencionais para tratamento de águas, com ênfase nas vantagens e limitações de cada classe.
Soares et al. (2020)	Avanços recentes em biossorventes magnéticos para tratamento de águas, incluindo estratégias de funcionalização <i>in situ</i> e pós-síntese.
Osman et al. (2023)	Revisão de larga escala sobre métodos de preparação de biossorventes e sorventes magnéticos para tratamento de águas, integrando tipologia, mecanismos e regeneração.

Fonte: elaboração própria a partir das referências citadas.

4 MECANISMOS DE BIOSSORÇÃO EM MATRIZES LIGNOCELULÓSICAS

4.1 Composição lignocelulósica e sítios ativos

A reatividade dos biossorventes lignocelulósicos decorre, em larga medida, da composição química das paredes celulares vegetais, formadas por três macromoléculas principais: celulose, hemicelulose e lignina. A celulose, polímero linear de β -D-glicose com ligações 1,4-glicosídicas, contribui com numerosos grupos hidroxila acessíveis a interações por ligação de hidrogênio e à derivatização química. A hemicelulose, mais ramificada e mais reativa, acrescenta grupos carbonila e carboxílicos, sobretudo quando contém ácidos urônicos. A lignina, polímero fenólico tridimensional, traz fenóis, metoxilas e carbonilas, com forte tendência a interagir com cátions metálicos e moléculas orgânicas via complexação e atrações π (ABDOLALI et al., 2014; KARIM et al., 2023).

Essa heterogeneidade funcional explica a versatilidade desses materiais. A depender do contaminante-alvo, prevalecem grupos diferentes: cátions metálicos divalentes coordenam-se preferencialmente com grupos carboxílicos desprotonados e fenolatos; corantes catiônicos respondem a sítios negativamente carregados na superfície; corantes aniônicos exigem, em geral, superfícies protonadas, alcançadas por

ajuste de pH ou por modificação química com grupos amino (CRINI, 2006; SUD; MAHAJAN; KAUR, 2008; OSMAN et al., 2023).

4.2 Rotas mecânicas predominantes

As principais rotas para o mecanismo de biossorção reportadas em matrizes lignocelulósicas incluem troca iônica, complexação superficial, interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas e do tipo π - π . A troca iônica costuma ocorrer entre cátions metálicos e prótons ou contra-íons associados a grupos carboxílicos e fenólicos. A complexação superficial envolve a formação de complexos de coordenação entre íons metálicos e ligantes da superfície. As interações eletrostáticas modulam a aproximação de adsorvatos carregados, enquanto as ligações de hidrogênio aparecem com frequência em moléculas orgânicas polares. Interações π - π são relevantes, em particular, entre corantes aromáticos e estruturas da lignina (VOLESKY, 2007; ABDOLALI et al., 2014; OSMAN et al., 2023).

Em sistemas reais, esses mecanismos não atuam isoladamente: eles coexistem e competem. Por essa razão, interpretações baseadas apenas em ajustes cinéticos ou isotérmicos têm alcance limitado. Caracterizações espectroscópicas — FTIR para identificação de grupos funcionais antes e após a adsorção, XPS para análise da química de superfície e dos estados de oxidação, MEV-EDS para morfologia e composição elementar, além de difração de raios X (DRX) e análises termogravimétricas — oferecem sustentação experimental mais sólida às hipóteses mecânicas (LIMA et al., 2019; HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024).

4.3 Influência das variáveis operacionais

O pH é, possivelmente, a variável mais determinante do desempenho desses materiais. Em valores baixos, grupos carboxílicos permanecem protonados e a superfície tende a se tornar positiva, o que favorece a captura de espécies aniônicas e desfavorece a de cátions. Em pH mais elevado, o quadro se inverte; pior, sob certas condições, surge o risco de precipitação de hidróxidos metálicos, que pode ser interpretada erroneamente como adsorção. A força iônica modula as interações eletrostáticas: aumentos de salinidade frequentemente reduzem a captura de corantes catiônicos por competição. A temperatura, por sua vez, sinaliza a natureza energética do processo:

adsorções endotérmicas tendem a aumentar com a temperatura, enquanto adsorções exotérmicas declinam (HO; MCKAY, 1999; TRAN et al., 2017; LIMA et al., 2019; GAUTAM et al., 2023).

5 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS APLICADOS COMO BIOSSORVENTES

A diversidade de resíduos lignocelulósicos investigados como biossorventes é amplamente documentada na literatura: levantamentos recentes em bases como Scopus e Web of Science apontam centenas de artigos publicados anualmente sobre o tema, com crescimento contínuo na última década (KARIM et al., 2023; OSMAN et al., 2023; HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024). Por essa razão, propõe-se neste artigo um agrupamento em cinco categorias, descritas a seguir.

5.1 Bagaço de cana-de-açúcar

No contexto brasileiro, o bagaço de cana-de-açúcar é o resíduo lignocelulósico mais abundante; estima-se que cada tonelada de cana moída gere cerca de 250-280 kg de bagaço úmido, o que, à luz dos 673 milhões de toneladas processados na safra 2025/2026 (CONAB, 2026), corresponde a uma disponibilidade da ordem de 180 milhões de toneladas anuais desse subproduto. Sua composição média gira em torno de 40-45 % de celulose, 25-30 % de hemicelulose e 20-25 % de lignina, com granulometria adequada e ampla disponibilidade regional. A literatura relata seu uso, *in natura* e após modificações, na remoção de corantes têxteis (azo e antraquinônicos) e de metais como Cd(II), Pb(II), Cu(II) e Cr(VI). Entre as estratégias mais frequentes para incrementar a capacidade adsorptiva, destacam-se a modificação alcalina com NaOH, o tratamento com ácidos orgânicos (cítrico, tartárico) e a conversão em biocarvão por pirólise controlada (ABDOLALI et al., 2014; KARIM et al., 2023). Revisões recentes mostram, ainda, que compósitos magnéticos baseados em bagaço de cana têm desempenho competitivo para metais pesados (HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024).

5.2 Cascas: arroz, banana, coco, laranja e amendoim

As cascas constituem uma das classes mais estudadas. A casca de arroz, rica em sílica (cerca de 15-20 % do peso seco), destaca-se pela estrutura porosa e elevada estabilidade térmica, o que a torna precursor frequente de carvões ativados e biocarvões com bom desempenho frente a corantes e metais; revisões dedicadas

mostram aplicabilidade ampla para Cd(II), Pb(II), Zn(II) e azul de metileno (LI et al., 2023; GAUTAM et al., 2023). Cascas de banana e de laranja, por sua vez, contêm pectinas, celulose e compostos fenólicos que conferem afinidade por cátions metálicos; ambas têm recebido tratamento sistemático em revisões dedicadas, com bons resultados para Cu(II), Pb(II), Ni(II) e Cr(VI), tanto *in natura* quanto modificadas (AKPOMIE; CONRADIE, 2020; MICHAEL-IGOLIMA et al., 2023; RAHMAN et al., 2026). Casca de coco e casca de amendoim, com elevado teor de lignina, são tradicionalmente utilizadas como precursores de carvão ativado. A diversidade de composição e a disponibilidade regional dessas biomassas explicam sua presença consistente na literatura (SUD; MAHAJAN; KAUR, 2008; CRINI et al., 2019; KARIM et al., 2023).

5.3 Sabugo e palha de milho

Sabugo e palha de milho aparecem com destaque em estudos sobre biocarvões e compósitos magnéticos, particularmente para a remoção de metais e contaminantes orgânicos. Considerando-se a safra brasileira de milho de cerca de 322 milhões de toneladas em 2024/2025 (CONAB, 2025), e estimativas conservadoras de geração de 100-150 kg de sabugo por tonelada de grãos, tem-se um potencial anual da ordem de 30 a 45 milhões de toneladas de sabugo. A morfologia porosa resultante da pirólise confere superfícies específicas elevadas; combinada à incorporação de óxidos de ferro, gera materiais magnéticos com desempenho competitivo na remoção de corantes catiônicos (azul de metileno, violeta cristal), metais (Pb, Cu, Cd) e, mais recentemente, fármacos como tetraciclina e diclofenaco (ZHAO et al., 2021; OSMAN et al., 2023; HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024; DAFFALLA, 2025).

5.4 Tortas, talos e resíduos de prensagem

Tortas de prensagem de oleaginosas (algodão, mamona, soja, dendê), talos de sorgo e trigo, e resíduos lignocelulósicos do processamento de cereais figuram em estudos voltados à remoção de metais e corantes. Em geral, esses materiais demandam algum tipo de pré-tratamento — lavagem, secagem, moagem e ativação química — para padronização granulométrica e remoção de extrativos. A literatura sobre essa categoria é, ainda, menos densa que a das cascas e do bagaço de cana, o que pode ser lido como oportunidade de pesquisa, sobretudo no aproveitamento de tortas brasileiras de mamona e dendê para a remoção de metais em efluentes de mineração e de

galvanoplastia.

6 MODELOS CINÉTICOS E ISOTÉRMICOS

6.1 Cinética

A maioria dos estudos examina o avanço temporal da adsorção por meio dos modelos de pseudo-primeira ordem (Lagergren), pseudo-segunda ordem (Ho e McKay) e difusão intrapartícula (Weber-Morris). O modelo de pseudo-segunda ordem é, com larga vantagem, o mais frequentemente reportado como melhor ajuste para biossorventes lignocelulósicos. Para biomassas brasileiras, em particular, esse padrão se confirma em estudos com bagaço de cana e cascas de arroz, banana e laranja (AKPOMIE; CONRADIE, 2020; LI et al., 2023; GAUTAM et al., 2023; MICHAEL-IGOLIMA et al., 2023; RAHMAN et al., 2026). Costuma-se interpretar essa preferência como indício de adsorção com forte componente química, mas é necessária cautela analítica: como discutiram Tran et al. (2017) e Lima et al. (2019), a aparente superioridade do modelo de pseudo-segunda ordem em sua forma linearizada decorre, em parte, da própria estrutura matemática da linearização, que confere peso desproporcional aos pontos próximos ao equilíbrio. Em ajustes não-lineares, a diferença entre modelos costuma ser menos pronunciada, e a escolha precisa ser apoiada por análises de resíduos, coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajustado), funções erro como χ^2 , SSE e ARE, além de critérios estatísticos como o Akaike Information Criterion (AIC), conforme detalhado por Tran et al. (2017).

6.2 Equilíbrio

Para a etapa de equilíbrio, predominam as isotermas de Langmuir, Freundlich, Temkin e Dubinin-Radushkevich. A isoterma de Langmuir, baseada na hipótese de monocamada em sítios energeticamente equivalentes, é a mais reportada como melhor ajuste em biossorventes lignocelulósicos, oferecendo o parâmetro q_{max} como referência comparativa de capacidade máxima — padrão observado, por exemplo, nos trabalhos com casca de banana e laranja (AKPOMIE; CONRADIE, 2020; MICHAEL-IGOLIMA et al., 2023; RAHMAN et al., 2026), com biocarvão de casca de arroz para Cd(II) (GAUTAM et al., 2023) e com biocarvões magnéticos para corantes (HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024; DAFFALLA, 2025). A isoterma de Freundlich descreve bem sistemas

heterogêneos e é útil quando coexistem famílias de sítios com energias distintas, situação relatada em sistemas multimetálicos e em biomassas modificadas. A Temkin incorpora indiretamente a interação adsorvente-adsorvato, e a Dubinin-Radushkevich permite uma estimativa qualitativa do caráter físico ou químico da adsorção a partir da energia média de sorção (CRINI, 2006; ABDOLALI et al., 2014; OSMAN et al., 2023).

6.3 Boas práticas e armadilhas comuns

Tran et al. (2017) e os trabalhos correlatos de Lima e colaboradores reúnem um conjunto de armadilhas que merecem atenção. Entre elas, destacam-se: comparação de q_{max} obtidos em condições experimentais não equivalentes; uso de formas linearizadas que distorcem o peso estatístico dos dados; cálculo inadequado da constante termodinâmica para a equação de van't Hoff; falta de relato de erros experimentais e de réplicas; ausência de análise espectroscópica para sustentar interpretações mecanísticas. As recomendações são convergentes: priorizar regressão não-linear; relatar todas as condições experimentais — pH, temperatura, dose de adsorvente, granulometria, concentração inicial e tempo de contato; integrar modelagem e caracterização físico-química do adsorvente antes e após a adsorção (TRAN et al., 2017; LIMA et al., 2019).

A Tabela 3 organiza, por classes de biomassa, contaminantes-alvo e modelos mais frequentemente relatados como melhor ajuste. Como antecipado na metodologia, optou-se por descrever o desempenho de modo qualitativo, com indicação explícita quando os dados numéricos devem ser checados nos artigos originais antes do uso comparativo.

Tabela 3 — Biomassas lignocelulósicas, contaminantes-alvo, modelos predominantes e desempenho relativo relatado na literatura analisada.

Biomassa	Contaminante de interesse	Modelos predominantes	Desempenho relativo / observações
Bagaço de cana-de-açúcar (<i>in natura</i> e modificado)	Cu(II), Pb(II), Cd(II), Cr(VI); corantes azo e antraquinônicos	Pseudo-segunda ordem; Langmuir (KARIM et al., 2023; HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024)	Capacidade adsortiva sensível ao pH e à modificação química; valores numéricos de q_{max} devem ser conferidos nos artigos originais antes de comparações
Casca de arroz e seus	Corantes catiônicos (azul de metileno);	Pseudo-segunda ordem; Langmuir; Freundlich	Boa estabilidade térmica e desempenho ampliado após

Biomassa	Contaminante de interesse	Modelos predominantes	Desempenho relativo / observações
biocarvões	Cd(II), Pb(II), Zn(II); tetraciclina	(GAUTAM et al., 2023; LI et al., 2023)	pirólise e modificação com H ₃ PO ₄ ou NaOH; q _{max} a verificar nos artigos primários
Cascas de banana e de laranja	Cu(II), Pb(II), Ni(II), Cr(VI); corantes catiônicos	Pseudo-segunda ordem; Langmuir (AKPOMIE; CONRADIE, 2020; MICHAEL-IGOLIMA et al., 2023; RAHMAN et al., 2026)	Afinidade por cátions atribuída à presença de pectinas, celulose e compostos fenólicos; revisões recentes confirmam bom desempenho com modificações simples
Cascas de coco e de amendoim (precursores de carvão ativado)	Corantes têxteis; compostos fenólicos; Cd(II), Pb(II)	Pseudo-segunda ordem; Langmuir; eventualmente Freundlich (CRINI et al., 2019; KARIM et al., 2023)	Excelente desempenho após ativação química (KOH, ZnCl ₂ , H ₃ PO ₄); q _{max} fortemente dependente do agente ativador
Sabugo de milho (biocarvão e biocarvão magnético)	Metais (Pb, Cu, Cd) e corantes; estudos recentes incluem contaminantes orgânicos (tetraciclina, diclofenaco)	Pseudo-segunda ordem; Langmuir (ZHAO et al., 2021; OSMAN et al., 2023; DAFFALLA, 2025)	Material recorrente em estudos sobre compósitos magnéticos; bom desempenho e separação magnética rápida após incorporação de Fe ₃ O ₄
Palhas e talos (milho, trigo, sorgo)	Metais; corantes; potencial para contaminantes emergentes	Pseudo-segunda ordem; Langmuir; Freundlich (ABDOLALI et al., 2014; OSMAN et al., 2023)	Disponibilidade abundante; demanda pré-tratamento para padronização granulométrica e remoção de extrativos
Tortas de prensagem de oleaginosas	Metais; corantes	Pseudo-segunda ordem; Langmuir (SUD; MAHAJAN; KAUR, 2008; ABDOLALI et al., 2014)	Literatura mais escassa; potencial subexplorado, especialmente para mamona e dendê no contexto brasileiro

Fonte: elaboração própria, com base em Abdolali et al. (2014), Akpomie e Conradie (2020), Crini et al. (2019), Gautam et al. (2023), Karim et al. (2023), Li et al. (2023), Michael-Igolima et al. (2023), Osman et al. (2023), Hama Aziz, Fatah e Muhammad (2024), Daffalla (2025), Rahman et al. (2026) e referências afins. Os valores numéricos de capacidade máxima de adsorção (q_{max}) devem ser checados nos artigos primários antes de qualquer uso comparativo, em conformidade com as recomendações de Tran et al. (2017) e Lima et al. (2019).

7 MODIFICAÇÕES QUÍMICAS E MATERIAIS HÍBRIDOS MAGNÉTICOS

7.1 Pré-tratamentos físico-químicos

As biomassas *in natura*, embora atrativas pelo custo, frequentemente trazem limitações: liberação de extrativos, baixa estabilidade em pH extremo, granulometria heterogênea e capacidade adsortiva modesta. Pré-tratamentos são utilizados para mitigar essas limitações. Tratamentos alcalinos com NaOH e Ca(OH)₂ removem extrativos e expõem grupos -OH e -COOH; tratamentos ácidos com HCl, H₂SO₄ ou ácidos

orgânicos (cítrico, tartárico) promovem hidrólise parcial e introdução de grupos carboxílicos; tratamentos oxidativos com H_2O_2 oxidam superfícies e podem aumentar a densidade de grupos $-COOH$ (CRINI, 2006; ABDOLALI et al., 2014; OSMAN et al., 2023). Para casos específicos, como a remoção de $Cd(II)$ por casca de arroz, modificações com H_3PO_4 e $NaOH$ têm sido reportadas com bons resultados, com ganhos de capacidade adsortiva e maior estabilidade do material em meio ácido (GAUTAM et al., 2023).

7.2 Enxerto de grupos funcionais

A modificação por enxerto de grupos funcionais ($-COOH$, $-NH_2$, $-SH$) representa um salto qualitativo em afinidade e seletividade. A introdução de grupos amino, por exemplo, é estratégica para a captura de corantes aniônicos e de ânions metálicos como $Cr(VI)$; grupos tiol mostram-se particularmente eficazes na captura de mercúrio e de outros metais moles. Estratégias com epicloridrina, etilenodiamina e ácidos cítrico/tartárico configuram, segundo a literatura, abordagens robustas e de relativo baixo custo (SOARES et al., 2020; OSMAN et al., 2023; MICHAEL-IGOLIMA et al., 2023).

7.3 Biocarvões e carvões ativados de resíduos lignocelulósicos

A pirólise controlada de resíduos lignocelulósicos gera biocarvões com superfícies específicas superiores às das biomassas brutas, embora a magnitude desse incremento dependa fortemente da temperatura e do tempo de pirólise. Ativações químicas com KOH , $ZnCl_2$, H_3PO_4 e outros agentes geram carvões ativados com elevada área superficial e desempenho competitivo frente a carvões comerciais. A literatura recente destaca, ainda, o potencial dos biocarvões na remoção de contaminantes emergentes, como fármacos e agrotóxicos (MORIN-CRINI et al., 2022; LI et al., 2023; OSMAN et al., 2023).

7.4 Biossorbentes e biocarvões magnéticos

A frente mais dinâmica do campo é, hoje, a obtenção de compósitos magnéticos a partir de biomassa lignocelulósica ou de biocarvões delas derivados. A incorporação de magnetita (Fe_3O_4) ou de outros óxidos de ferro, em geral em escala nanométrica, confere aos materiais a capacidade de serem separados da fase líquida pela simples aplicação de um campo magnético externo. Esse atributo resolve um dos principais gargalos operacionais da biossorção convencional — a separação sólido-líquido em

escala — e abre caminho para uso em colunas e fluxos contínuos (SOARES et al., 2020; ZHAO et al., 2021; OSMAN et al., 2023; HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024).

As rotas de preparação se dividem em funcionalização *in situ*, na qual a precipitação ou síntese da fase magnética ocorre na presença da biomassa, e funcionalização pós-síntese, em que nanopartículas magnéticas previamente preparadas são acopladas ao bioissorvente por adsorção, *coating* ou ligação covalente. A funcionalização *in situ* é, em geral, mais simples; a pós-síntese permite controle mais refinado da fase magnética e da química de superfície (SOARES et al., 2020). Biocarvões magnéticos de bagaço de cana, casca de arroz, sabugo de milho e, mais recentemente, sementes de baobá têm sido reportados como eficientes na remoção de corantes, metais, microplásticos e fármacos (ZHAO et al., 2021; OSMAN et al., 2023; DAFFALLA, 2025).

7.5 Regeneração, reúso e estabilidade

A viabilidade prática dos bioissorventes magnéticos depende, em boa medida, de sua capacidade de regeneração. Os agentes de dessorção mais utilizados incluem soluções diluídas de ácidos minerais (HCl, HNO₃) e de bases (NaOH), além de agentes quelantes como o EDTA e álcoois para corantes orgânicos. A escolha do agente é guiada pelo tipo de contaminante: ácidos diluídos são eficazes para metais, devido à competição protônica pelos sítios de adsorção; soluções básicas tendem a desorver corantes aniônicos; álcoois e misturas hidroalcoólicas são preferidos para corantes orgânicos hidrofóbicos. Reusos sucessivos costumam apresentar perda gradual de capacidade adsorptiva, atribuída ao bloqueio progressivo de sítios e à lixiviação parcial da fase magnética. A estabilidade da magnetita em pH extremo é uma preocupação operacional concreta, e revestimentos protetores — sílica, polímeros — vêm sendo investigados (SOARES et al., 2020; OSMAN et al., 2023).

8 LIMITAÇÕES, LACUNAS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A despeito do volume da literatura, o campo da biossorção com resíduos lignocelulósicos preserva lacunas estruturais. A mais expressiva é a forte dependência de ensaios em batelada com soluções sintéticas mono-componente — condição distante das matrizes reais, em que coexistem múltiplos contaminantes, matéria

orgânica natural e sais. Há também o problema persistente da comparação entre estudos: a heterogeneidade de condições experimentais e a falta de padronização no reporte de parâmetros tornam a meta-análise quantitativa um empreendimento arriscado (TRAN et al., 2017; LIMA et al., 2019). Some-se a isso a escassez de ensaios em coluna de leito fixo e em escala-piloto, e tem-se um retrato razoavelmente fiel do estado da arte.

Outras lacunas relevantes incluem a avaliação toxicológica do efluente após o tratamento; a análise de ciclo de vida (ACV) dos biossorventes magnéticos, com especial atenção à fonte e à estabilidade dos óxidos de ferro; estudos de regeneração em múltiplos ciclos sob condições realistas; e a investigação aprofundada da remoção de contaminantes emergentes em matrizes reais. Em paralelo, a articulação com princípios da economia circular — destinação final do biossorvente exaurido, recuperação do contaminante adsorvido e integração com cadeias produtivas locais — segue como uma fronteira promissora (MORIN-CRINI et al., 2022; KARIM et al., 2023; OSMAN et al., 2023). A Tabela 4 sistematiza essas lacunas e aponta direções para pesquisas futuras.

Tabela 4 — Principais lacunas identificadas na literatura e perspectivas de pesquisa para biossorventes lignocelulósicos, com ênfase em compósitos magnéticos.

Eixo	Lacuna identificada	Perspectiva de pesquisa
Padronização experimental	Heterogeneidade de condições e de relato; uso predominante de formas linearizadas	Adoção de protocolos comuns; regressão não-linear e reporte de erros; replicação independente
Matrizes reais	Estudos majoritariamente em soluções sintéticas mono-componente	Ensaio em efluentes reais (têxteis, galvânicos, hospitalares), com matriz complexa e sob competição de espécies
Escala	Predomínio de batelada; poucos estudos em coluna de leito fixo e em escala-piloto	Avaliação em colunas, modelagem de <i>breakthrough</i> (Thomas, Adams-Bohart, Yoon-Nelson); testes em escala-piloto
Toxicidade pós-tratamento	Avaliação raramente reportada	Ensaio ecotoxicológicos padronizados (<i>Daphnia</i> , <i>Vibrio</i> , <i>Lactuca</i> etc.) com efluente tratado
Análise de ciclo de vida (ACV)	Estudos pontuais; baixa cobertura para compósitos magnéticos	ACV completa de obtenção, uso e disposição, incluindo a fase magnética
Regeneração e estabilidade	Poucos ciclos avaliados; perdas atribuídas à lixiviação de Fe ₃ O ₄ não rigorosamente quantificadas	Revestimentos protetores (sílica, polímeros), avaliação de lixiviação metálica e múltiplos ciclos sob condições realistas
Contaminantes emergentes	Estudos crescentes, porém ainda limitados em amplitude química	Ampliar para microplásticos, fármacos, hormônios e antibióticos em concentrações

Eixo	Lacuna identificada	Perspectiva de pesquisa
		ambientais
Economia circular	Articulação com cadeias produtivas locais ainda incipiente	Modelos territoriais de aproveitamento de resíduos agroindustriais; recuperação de metais adsorvidos; alinhamento com ODS 6, 12 e 15

Fonte: elaboração própria, com base em Tran et al. (2017), Lima et al. (2019), Morin-Crini et al. (2022), Karim et al. (2023) e Osman et al. (2023).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão integrativa permitiu organizar, sob um eixo coerente, a literatura sobre biossorventes lignocelulósicos de origem agroindustrial e seu emprego na remoção de contaminantes aquáticos. Três conclusões principais emergem do material analisado. A primeira é que há sólido suporte teórico e empírico para o uso desses materiais em sistemas modelo, com predomínio dos modelos de pseudo-segunda ordem (cinética) e de Langmuir (equilíbrio); essa coerência, contudo, precisa ser lida com cautela à luz das críticas metodológicas de Tran et al. (2017) e Lima et al. (2019). A segunda é que modificações químicas e a obtenção de compósitos magnéticos vêm se consolidando como rotas para superar limitações operacionais — em especial, a separação sólido-líquido — e abrem espaço para aplicações em fluxo contínuo (HAMA AZIZ; FATAH; MUHAMMAD, 2024; DAFFALLA, 2025). A terceira é que os principais avanços futuros estarão na integração entre química de superfície, engenharia de processos e avaliação ambiental: a transição de ensaios em soluções sintéticas para matrizes reais, a padronização experimental, a avaliação toxicológica e de ciclo de vida e os ensaios em escala-piloto são desafios que demandam articulação interdisciplinar.

Para que biossorventes lignocelulósicos — sobretudo os magnéticos — passem da categoria de promessa à de tecnologia consolidada, algumas condições precisam amadurecer: (i) a realização de ensaios em efluentes reais, com matrizes industriais complexas (têxtil, galvânica, hospitalar) e em sistemas multi-componente; (ii) a adoção generalizada da regressão não-linear na modelagem cinética e isotérmica, com reporte completo de erros experimentais e funções de erro; (iii) a avaliação ecotoxicológica do material e do efluente tratados, em diferentes organismos-teste; (iv) o aumento do número de estudos em coluna de leito fixo e em escala-piloto, com modelagem de

curvas de saturação; (v) a quantificação rigorosa da lixiviação metálica em biocarvões magnéticos ao longo de múltiplos ciclos de reuso; e (vi) a integração com análises de ciclo de vida e com modelos territoriais de economia circular.

No contexto brasileiro, em particular, a abundância e a diversidade de resíduos agroindustriais representam, simultaneamente, um passivo a ser gerenciado e um ativo a ser convertido em soluções de baixo custo para o tratamento de águas. A consolidação dessa via dependerá, em última análise, de pesquisas que combinem rigor experimental, transparência metodológica e compromisso com a aplicabilidade em condições reais, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.

REFERÊNCIAS

ABDOLALI, A.; GUO, W. S.; NGO, H. H.; CHEN, S. S.; NGUYEN, N. C.; TUNG, K. L. Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: a critical review. *Bioresource Technology*, v. 160, p. 57-66, 2014.

AKPOMIE, K. G.; CONRADIE, J. Banana peel as a biosorbent for the decontamination of water pollutants. A review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 18, n. 4, p. 1085-1112, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar — Safra 2024/2025*, v. 11, n. 4 — Quarto Levantamento. Brasília, DF: CONAB, abr. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar — Safra 2025/2026*, v. 12, n. 4 — Quarto Levantamento. Brasília, DF: CONAB, abr. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos — Safra 2025/2026*, v. 13, n. 4 — Quarto Levantamento. Brasília, DF: CONAB, jan. 2026.

CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. *Bioresource Technology*, v. 97, n. 9, p. 1061-1085, 2006.

CRINI, G.; LICHTFOUSE, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, v. 17, n. 1, p. 145-155, 2019.

CRINI, G.; LICHTFOUSE, E.; WILSON, L. D.; MORIN-CRINI, N. Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, v. 17, n. 1, p. 195-213, 2019.

DAFFALLA, S. Biomass-derived magnetic Fe₃O₄/biochar nanoparticles from baobab seeds for sustainable wastewater dye remediation. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 26, n. 17, art. 8499, 2025.

FREUNDLICH, H. M. F. Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, v. 57, p. 385-470, 1906.

- GAUTAM, K.; GUPTA, N.; PATEL, D. K.; SINGH, R. P.; SINGH, A. Comparative study of simple and modified rice husk biochar for cadmium removal: adsorption performance and possible mechanisms. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, v. 72, n. 7, p. 1269-1287, 2023.
- HAMA AZIZ, K. H.; FATAH, N. M.; MUHAMMAD, K. T. Advancements in application of modified biochar as a green and low-cost adsorbent for wastewater remediation from organic dyes. *Royal Society Open Science*, v. 11, n. 5, art. 232033, 2024.
- HO, Y. S.; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, v. 34, n. 5, p. 451-465, 1999.
- KARIM, A.; RAJI, Z.; KARAM, A.; KHALLOUFI, S. Valorization of fibrous plant-based food waste as biosorbents for remediation of heavy metals from wastewater — a review. *Molecules*, v. 28, n. 10, art. 4205, 2023.
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.
- LI, Z.; ZHENG, Z.; LI, H.; XU, D.; LI, X.; XIANG, L.; TU, S. Review on rice husk biochar as an adsorbent for soil and water remediation. *Plants*, v. 12, n. 7, art. 1524, 2023.
- LIMA, E. C.; HOSSEINI-BANDEGHARAEI, A.; MORENO-PIRAJÁN, J. C.; ANASTOPOULOS, I. A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoff equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. *Journal of Molecular Liquids*, v. 273, p. 425-434, 2019.
- MICHAEL-IGOLIMA, U.; ABBEY, S. J.; IFELEBUEGU, A. O.; EYO, E. U. Modified orange peel waste as a sustainable material for adsorption of contaminants. *Materials*, v. 16, n. 3, art. 1092, 2023.
- MORIN-CRINI, N.; LICHTFOUSE, E.; FOURMENTIN, M. et al. Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments. A review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 20, n. 2, p. 1333-1375, 2022.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Resolução A/RES/70/1, adotada pela Assembleia Geral em 25 de setembro de 2015. Nova York: ONU, 2015.
- OSMAN, A. I.; ABD EL-MONAEM, E. M.; ELGARAHY, A. M. et al. Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 21, n. 4, p. 2337-2398, 2023.
- PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, art. n71, 2021.
- RAHMAN, M. J. et al. Valorization of banana peel and orange peel as low-cost biosorbents for Cu(II), Cr, and Pb(II) removal from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, v. 325, art. 101660, 2026.
- SCHWARZENBACH, R. P.; ESCHER, B. I.; FENNER, K. et al. The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, v. 313, n. 5790, p. 1072-1077, 2006.
- SOARES, S. F.; FERNANDES, T.; TRINDADE, T.; DANIEL-DA-SILVA, A. L. Recent advances on magnetic biosorbents and their applications for water treatment. *Environmental*



Chemistry Letters, v. 18, n. 1, p. 151-164, 2020.

SUD, D.; MAHAJAN, G.; KAUR, M. P. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions — a review. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 14, p. 6017-6027, 2008.

TRAN, H. N.; YOU, S.-J.; HOSSEINI-BANDEGHARAEI, A.; CHAO, H.-P. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review. *Water Research*, v. 120, p. 88-116, 2017.

VOLESKY, B. Biosorption and me. *Water Research*, v. 41, n. 18, p. 4017-4029, 2007.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

ZHAO, Q.; XU, T.; SONG, X.; NIE, S.; CHOI, S.-E.; SI, C. Preparation and application in water treatment of magnetic biochar. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 9, art. 769667, 2021.