



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS -
UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**



**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA, MATEMÁTICA E
EDUCAÇÃO**

MATHEUS ALVES FERREIRA

**DIMENSÃO ECONÔMICA DO USO DE BIOSORVENTES PARA REMOÇÃO DE
POLUENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

**ARARAS - SP
2025**

MATHEUS ALVES FERREIRA

**DIMENSÃO ECONÔMICA DO USO DE BIOSORVENTES PARA REMOÇÃO DE
POLUENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

Monografia apresentada no curso de
Licenciatura em Química da
Universidade Federal de São Carlos
para aprovação na disciplina de
Monografia II.

Orientação: Prof.^a Dr. Andréa Eloisa
Bueno Pimentel

**ARARAS
2025**

MATHEUS ALVES FERREIRA

**DIMENSÃO ECONÔMICA DO USO DE BIOSORVENTES PARA REMOÇÃO DE
POLUENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de TCC do candidato Matheus Alves Ferreira, realizada em 05/12/2025:

Prof. Dr. Andréa Eloisa Bueno Pimentel
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Virginia Claudia Paulino Silva
Universidade Federal de São Carlos

Mestre Gabriel Vinicius Buzato
Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, em primeiro lugar, por me abençoar com todas as oportunidades que tive durante a graduação. Além de ter me dado forças para não desistir quando tudo estava péssimo.

Agradeço imensamente aos meus pais (Edson e Patrícia) por terem me dado todo o apoio possível para realização dessa graduação; e sempre preocupados comigo. Além do amor e carinho dado. Amo vocês.

Agradeço aos meus amigos (Alicia, Alessandro, Julio, Tainá, Ana, Gabriella, Gabriel, Rhayana e Isabela) que me acompanharam durante os longos anos de curso e me permitiram ser mais feliz, além de encarar os desafios sempre com uma risada, descontração e conforto. Sem vocês, muitas aulas seriam diferentes.

Agradeço à minha orientadora Andréa, que acreditou no meu potencial e me aceitou de braços abertos desde o começo, sempre disposta a me auxiliar no que fosse necessário, sem represália. Sem sua orientação esse trabalho nunca seria possível de ser realizado. Serei eternamente grato por isso!

Obrigado UFSCar por me dar oportunidades que nunca pensei que teria. Por ter conhecido pessoas e culturas muito diferentes do meu entorno. Por ter me ensinado temas e áreas que não possuía conhecimentos, tanto de química quanto de licenciatura. Saio da Universidade uma pessoa mentalmente diferente àquela que entrou em 2021.

E por fim, não poderia deixar de citar a pessoa que me acompanhou todos os dias. Minha companheira de curso e de vida: Alicia. Minha eterna amada, sem você eu não conseguiria chegar aonde cheguei. Você me ajudou nos momentos mais difíceis, sempre muito atenciosa e amorosa. Me mostrou que mesmo nos momentos mais difíceis existe a superação, felicidade e amor. Realizar o curso ao seu lado foi uma experiência incrível, sem você eu teria desistido de tudo. Gratidão imensa a você! Te amo!

*“Você sabe que encontrou a felicidade quando
vive um momento que não quer que acabe”*

-Clóvis de Barros Filho

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como propósito duplo: (1) analisar como a dimensão econômica é tratada em estudos científicos sobre bioissorventes no contexto da Economia Circular e (2) propor uma abordagem pedagógica para aplicação dessa temática no Ensino de Química. O eixo de pesquisa consistiu em uma Revisão Sistemática de 35 artigos, a qual evidenciou uma lacuna significativa: embora a eficiência técnica e ambiental dos bioissorventes obtidos a partir de resíduos esteja amplamente comprovada, a dimensão econômica permanece pouco explorada. A maioria dos trabalhos limita-se a justificar o baixo custo da matéria-prima, sem incorporar métricas quantitativas essenciais para a avaliação em escala industrial, como a Avaliação de Ciclo de Vida (LCA) ou estimativas de custos de investimento e operação (CAPEX/OPEX). Essa constatação reforça a necessidade de maior interdisciplinaridade entre Engenharia, Química e Economia para consolidar soluções efetivamente circulares. No eixo pedagógico, foi elaborada uma sequência didática estruturada nos Três Momentos Pedagógicos (Problematização, Organização e Aplicação do Conhecimento), utilizando o documentário Lixo Extraordinário e a abordagem Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS). A proposta busca promover uma educação científica crítica e contextualizada, estimulando nos estudantes do Ensino Médio a reflexão sobre os impactos do consumo e o potencial de reaproveitamento de resíduos em sistemas circulares. Este trabalho contribui tanto para o avanço do debate acadêmico, ao mapear lacunas e tendências na literatura sobre bioissorventes, quanto para a formação de uma consciência científica crítica no ambiente escolar, integrando dimensões técnicas, econômicas e pedagógicas como pilares da sustentabilidade.

Palavras-chave: poluentes; economia; viabilidade; ensino; momento pedagógico.

ABSTRACT

This Undergraduate Thesis has a dual purpose: (1) to analyze how the economic dimension is addressed in scientific studies on biosorbents within the framework of the Circular Economy and (2) to propose a pedagogical approach for applying this theme in Chemistry Teaching. The research axis consisted of a Systematic Literature Review of 35 articles, which revealed a significant gap: although the technical and environmental efficiency of biosorbents derived from waste is widely demonstrated, the economic dimension remains underexplored. Most studies are limited to justifying the low cost of raw materials, without incorporating quantitative metrics essential for industrial-scale assessment, such as Life Cycle Assessment (LCA) or capital and operational cost estimates (CAPEX/OPEX). This finding highlights the need for greater interdisciplinarity among Engineering, Chemistry, and Economics to consolidate effectively circular solutions. In the pedagogical axis, a didactic sequence was developed, structured on the Three Pedagogical Moments (Initial Problematization, Organization of Knowledge, and Application of Knowledge), using the documentary Waste Land and the Science-Technology-Society (STS) approach. The proposal aims to foster a contextualized and critical scientific education, encouraging high school students to reflect on consumption impacts and the potential for waste reuse within circular systems. It contributes both to advancing the academic debate by mapping research gaps and trends in biosorption and to promoting scientific education, integrating technical, economic, and pedagogical knowledge as pillars of sustainability.

Keywords: pollutants; economy; viability; teaching; pedagogical moments.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
1.1.1 Biossorventes e a remoção de contaminantes.....	11
1.1.2 Economia circular.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 ESTRATÉGIA DE BUSCA.....	16
3.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO.....	16
3.3 SELEÇÃO DOS ESTUDOS.....	17
3.4 ORGANIZAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1 PANORAMA GERAL DA AMOSTRA.....	18
4.2 CONTAMINANTES E ALVOS DE ESTUDO.....	18
4.3 COMO A DIMENSÃO ECONÔMICA É TRATADA NA LITERATURA.....	18
4.4 NATUREZA DAS ABORDAGENS: PADRÕES E LACUNAS.....	21
4.4.1 Abordagens superficiais predominantes (técnico-ambientais).....	21
4.4.2 Estudos parcialmente aprofundados: contribuições metodológicas.....	21
4.4.3 Ausência de estudos aprofundados: impacto e implicações.....	21
4.4.4 Lacunas identificadas.....	22
4.5 RELAÇÃO BIOSSORÇÃO × ECONOMIA CIRCULAR: INTERPRETAÇÃO CRÍTICA....	22
4.6 IMPLICAÇÕES PARA PESQUISA FUTURA E PARA A PRÁTICA.....	24
5 PROPOSTA PEDAGÓGICA.....	25
5.1 OBJETIVOS.....	27
5.2 CONTEÚDOS.....	27
5.3 METODOLOGIA.....	27
5.3.1 Primeiro Momento: Problematização Inicial.....	28
5.3.2 Segundo Momento: Organização do Conhecimento.....	28
5.3.3 Terceiro Momento: Aplicação do Conhecimento.....	29
5.4 RECURSOS DIDÁTICOS.....	30
5.5 RESULTADOS ESPERADOS.....	30
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
APÊNDICE 1.....	37

1 INTRODUÇÃO

A crescente presença de poluentes emergentes em corpos hídricos constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos. Substâncias como fármacos, pesticidas, corantes, metais pesados e hormônios (Mendonça *et al.*, 2024; Coldebella *et al.*, 2024; Vidovix *et al.*, 2024; Guimarães *et al.*, 2021; Inoue *et al.*, 2017) têm sido identificadas em águas superficiais e subterrâneas, muitas vezes persistindo mesmo após processos convencionais de tratamento. Tecnologias tradicionais, como coagulação–floculação, filtração em areia, cloração e processos biológicos convencionais (lodos ativados) (Ternes, 1998; Snyder *et al.*, 2003; Bolong *et al.*, 2009), apresentam eficiência limitada na remoção completa desses contaminantes, sobretudo devido à elevada estabilidade química e à baixa biodegradabilidade dessas substâncias, evidenciando a necessidade de alternativas mais eficazes. Evidenciando uma limitação dessas tecnologias tradicionais na remoção completa desses contaminantes (Verlicchi *et al.*, 2012).

A persistência desses compostos no ambiente aquático representa não apenas riscos à saúde humana, como disfunções endócrinas, efeitos toxicológicos crônicos e desenvolvimento de resistência antimicrobiana, mas também impactos significativos à biodiversidade, incluindo alterações reprodutivas em organismos aquáticos, bioacumulação e desequilíbrios ecológicos, resultando em efeitos cumulativos de difícil reversão (Colborn *et al.*, 1993; Kummerer, 2009; Aus Der Beek *et al.*, 2016).

Diante dessa problemática, torna-se imprescindível buscar alternativas mais eficazes, ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis. Nesse contexto, o processo de adsorção tem se destacado como solução promissora (Alomá *et al.*, 2014; Volesky, 2007; Rashmi *et al.*, 2024). A utilização de biomassa residual como adsorvente, conhecida como biossorção, é particularmente interessante por ser sustentável, de baixo custo, abundante e renovável, além de possibilitar modificação estrutural para aumento da capacidade adsorptiva (Xie; Chang; Kilbane II, 1996; Manna *et al.*, 2022). Essa característica conecta os biossorbentes não apenas ao potencial tecnológico, mas também a discussões sobre viabilidade econômica e aproveitamento de resíduos.

Essa versatilidade permite sua aplicação em diferentes classes de poluentes, tornando-os candidatos promissores para descontaminação de águas residuais. Além disso, ao aproveitar resíduos como biomassa, a abordagem se conecta aos princípios da economia circular, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte

inadequado, propondo, em seu lugar, um sistema regenerativo baseado na redução, reutilização e reciclagem de materiais (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Rashmi *et al.*, 2024).

A economia circular apresenta-se como uma alternativa ao modelo linear de produção e consumo, que historicamente se estrutura nas etapas de extração de recursos, transformação, utilização e descarte (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer *et al.*, 2017; Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017). Diferentemente desse padrão, a circularidade propõe prolongar ao máximo o ciclo de vida dos materiais, por meio de estratégias como reutilização, reciclagem, remanufatura e prolongamento da durabilidade dos produtos. Com isso, os resíduos deixam de ser vistos apenas como passivos ambientais e passam a representar potenciais recursos a serem reintroduzidos nos processos produtivos, reduzindo a necessidade de extração de matérias-primas e os impactos associados. Para além do viés ambiental, a economia circular também contempla dimensões sociais e econômicas, ao estimular modelos produtivos mais resilientes e sustentáveis, alinhados às demandas contemporâneas por desenvolvimento equilibrado (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017).

Além das dimensões ambiental e tecnológica, a avaliação da viabilidade econômica tem papel essencial na análise de processos sustentáveis, especialmente em contextos que envolvem o aproveitamento de resíduos e a transição para modelos de economia circular. Nesse sentido, diversos estudos vêm incorporando indicadores quantitativos que permitem mensurar o desempenho financeiro e ambiental de tecnologias emergentes (Madelá; Skuza, 2021; Mouga; Fernandes, 2022). Entre os principais parâmetros econômicos, destacam-se o CAPEX (Capital Expenditure), que representa o investimento inicial necessário para implantação do sistema (equipamentos, infraestrutura e instalação), e o OPEX (Operational Expenditure), relacionado aos custos operacionais contínuos de manutenção, energia, reagentes e mão de obra. Outra métrica de grande relevância é o LCA (Life Cycle Assessment), ou Avaliação do Ciclo de Vida, uma ferramenta amplamente utilizada para identificar e quantificar impactos ambientais e, em alguns casos, econômicos; ao longo de todas as etapas do processo, desde a obtenção da matéria-prima até o descarte ou reaproveitamento do material (Finnveden *et al.*, 2009).

A integração desses indicadores, notadamente através do LCA, possibilita uma compreensão mais completa da sustentabilidade dos sistemas estudados, unindo as dimensões técnica, econômica e ambiental. No caso dos biossorventes, essa abordagem é particularmente importante, pois permite comparar os custos e benefícios associados ao reaproveitamento de resíduos agroindustriais frente a tecnologias convencionais de

tratamento de efluentes. Dessa forma, o uso de métricas econômicas robustas auxilia na consolidação da bioissorção como alternativa viável dentro de um modelo de economia circular, promovendo tanto a eficiência de recursos quanto a valorização de subprodutos (Tan; Lamers, 2021; Finnveden *et al.*, 2009).

No caso dos bioissorventes, essa lógica vai além da simples remoção de contaminantes da água: ela representa também uma forma de valorizar subprodutos e incentivar práticas mais sustentáveis, voltadas para o uso eficiente dos recursos naturais (Tan; Lamers, 2021). Nesse sentido, a aproximação entre a ciência dos materiais e os princípios da circularidade surge como um caminho estratégico para responder aos desafios ambientais atuais e, ao mesmo tempo, fomentar soluções inovadoras de impacto socioeconômico.

Portanto, considerando esse cenário, o presente trabalho propõe uma revisão bibliográfica sobre como a dimensão econômica é abordada em estudos científicos sobre bioissorventes no contexto da Economia Circular. Para isso, primeiramente é feita a fundamentação teórica sobre bioissorventes e a remoção de contaminantes e sobre a Economia Circular; em seguida são apresentados os objetivos do trabalho, a metodologia usada para, em seguida, apresentar os resultados da pesquisa e as considerações. Também é apresentada uma proposta pedagógica para a aplicação desta temática no Ensino da Química.

1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1.1 Bioissorventes e a remoção de contaminantes

A bioissorção é um processo fundamentado na capacidade de materiais de origem biológica, ou derivados de biomassa, em remover substâncias presentes em meios aquosos, especialmente contaminantes como metais pesados, corantes e fármacos. Esse processo ocorre por meio de diferentes interações físico-químicas estabelecidas entre o poluente e a superfície do bioissorvente, destacando-se mecanismos como adsorção eletrostática, complexação, troca iônica, precipitação e interações hidrofóbicas, os quais estão diretamente relacionados à presença de grupos funcionais, tais como hidroxilas, carboxilas, aminas e fenóis, distribuídos na matriz da biomassa (Volesky, 2007; Park, Yun, Park, 2010).

Do ponto de vista conceitual, a bioissorção pode ser compreendida como uma forma específica de adsorção, na qual o material adsorvente é de origem biológica. De maneira geral, a adsorção refere-se ao acúmulo de espécies químicas na superfície de sólidos devido a

interações físicas ou químicas, enquanto a biossorção envolve, adicionalmente, a atuação de grupos funcionais naturais que conferem elevada afinidade por diferentes contaminantes. Essa característica torna os biossorbentes particularmente atrativos para aplicações em tratamento de águas e efluentes, sobretudo na remoção de compostos presentes em baixas concentrações e de difícil degradação por processos convencionais (Volesky, 2007).

Diversos materiais vêm sendo investigados como biossorbentes, incluindo resíduos agroindustriais, como cascas, sementes, bagaços e borra de café, além de biomassas microbianas, tais como fungos, bactérias e algas, bem como materiais lignocelulósicos modificados e biochars. A ampla diversidade desses materiais possibilita a aplicação da biossorção na remoção de uma extensa gama de contaminantes, incluindo metais pesados como Pb, Cd, Cr e Zn, corantes industriais, pesticidas, hormônios e poluentes emergentes, a exemplo de fármacos, evidenciando a versatilidade do processo (Ahmed; Hameed, 2018; Joshi *et al.*, 2024; Osman *et al.*, 2023).

A eficiência do processo de biossorção é frequentemente avaliada por meio da capacidade de adsorção do material, expressa como a quantidade de contaminante removida por unidade de massa do biossorvente. Essa relação pode ser descrita pela Equação 1, amplamente empregada em estudos de adsorção em sistemas aquosos:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} * V \quad (1)$$

Fonte: Santos (2019).

em que C_0 representa a concentração inicial de adsorbato (mg/L), C_e corresponde à concentração do adsorbato em equilíbrio (mg/L), V é o volume da solução (L), m a massa do biossorvente utilizada (g) e q_e é a massa adsorvida no equilíbrio (mg/g). Essa abordagem permite comparar a eficiência de diferentes materiais biossorbentes e avaliar o desempenho do processo sob distintas condições experimentais (Foo; Hameed, 2010).

Os mecanismos envolvidos na biossorção podem variar em função das características do biossorvente, da natureza do contaminante e das condições do meio, como pH, força iônica e temperatura. De modo geral, podem ser classificados em processos de adsorção física, associados a interações eletrostáticas e forças de Van der Waals, e adsorção química, relacionada à formação de ligações químicas mais fortes entre o contaminante e os grupos funcionais da biomassa. Processos como troca iônica e complexação são particularmente relevantes na remoção de metais pesados, enquanto interações hidrofóbicas desempenham

papel significativo na adsorção de compostos orgânicos, como fármacos e corantes (Park, Yun, Park, 2010; Ahmed; Hameed, 2018).

Entre as principais vantagens do uso de biossorventes destacam-se o baixo custo, a ampla disponibilidade, a biodegradabilidade e a possibilidade de empregar resíduos agroindustriais que, de outra forma, seriam descartados, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a valorização de resíduos. Esse aspecto confere ao processo forte alinhamento com os princípios da sustentabilidade e da economia circular. Entretanto, algumas limitações devem ser consideradas, como a necessidade de regeneração do material, a variabilidade da composição química da biomassa e a possível redução da eficiência em sistemas com elevada complexidade de contaminantes. Ainda assim, a biossorção tem se consolidado como uma alternativa promissora às tecnologias convencionais de tratamento de água e efluentes, configurando-se como um campo de estudo em constante expansão (Ahmed; Hameed, 2018; Chauhan *et al.*, 2025).

1.1.2 Economia circular

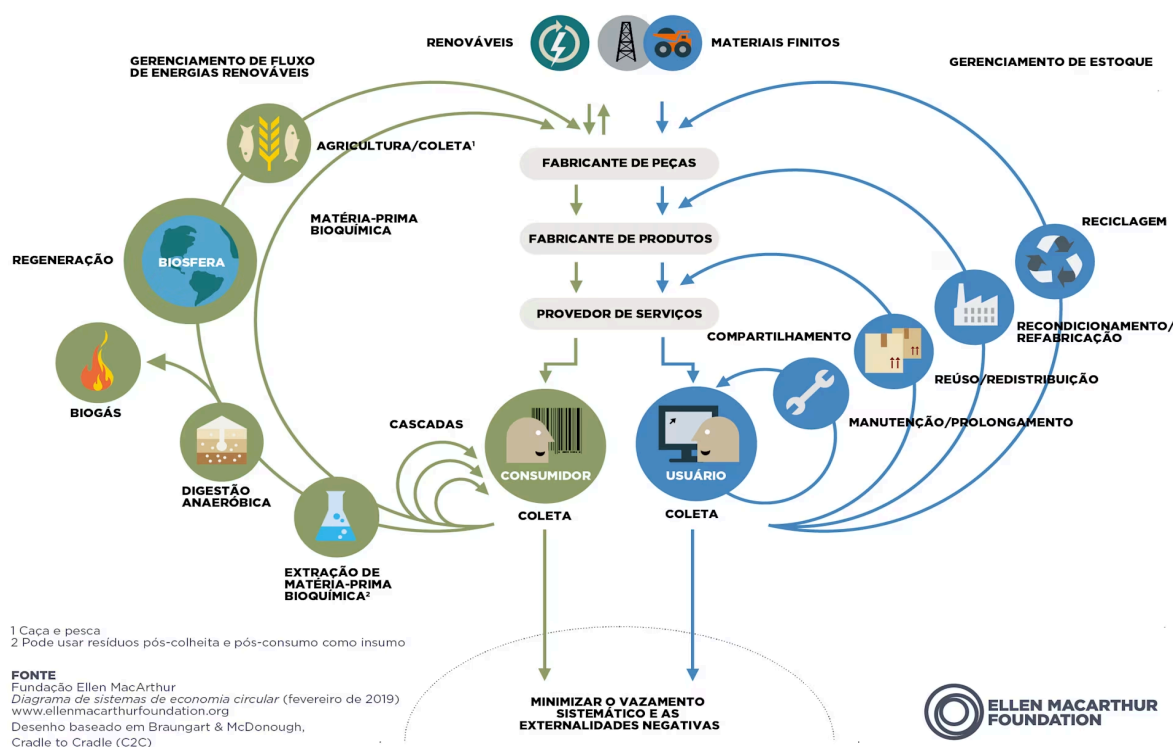
A economia circular é um modelo de desenvolvimento que se contrapõe ao sistema linear tradicional, baseado em extração, produção, consumo e descarte. Seu objetivo é manter os recursos em circulação pelo maior tempo possível, promovendo estratégias de reutilização, reciclagem, remanufatura e extensão da vida útil dos produtos (Ellen Macarthur Foundation, 2013; Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Um dos modelos mais conhecidos para explicar a economia circular é o Diagrama de Borboleta, proposto pela Ellen MacArthur Foundation, assim como está representado na imagem 1. Esse modelo apresenta, de forma visual e didática, os dois grandes ciclos que compõem a circularidade: o ciclo biológico e o ciclo técnico. O ciclo biológico é formado por materiais de origem natural, que podem retornar ao meio ambiente após o uso, sem causar impactos negativos. Nesse fluxo, resíduos orgânicos, como restos de alimentos e resíduos agrícolas, são reaproveitados por meio de processos como compostagem, digestão anaeróbia e regeneração de nutrientes, contribuindo para restaurar os ecossistemas e fechar o ciclo da matéria.

Já o ciclo técnico abrange materiais não biodegradáveis, como metais, plásticos e componentes industriais. Nesse caso, o objetivo é manter os produtos e materiais em uso pelo maior tempo possível, por meio de estratégias que incluem reuso, reparo, remanufatura, recondição e reciclagem. Esse ciclo busca conservar o valor dos materiais, evitando

que se tornem resíduos e reduzindo a necessidade de extração de novas matérias-primas. Assim, o diagrama de borboleta mostra que, em uma economia verdadeiramente circular, o ideal é manter o fluxo contínuo de materiais dentro desses dois sistemas, minimizando o desperdício e o envio de resíduos para aterros ou incineração.

Figura 1: O diagrama de borboleta: os ciclos biológico e técnico da economia circular.



Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2013).

No contexto deste trabalho, o diagrama de borboleta ajuda a compreender como os biossorventes se inserem na lógica da economia circular. Quando esses materiais são produzidos a partir de resíduos agrícolas ou agroindustriais, eles se encaixam no ciclo biológico, pois são de origem orgânica e podem retornar de forma segura à natureza após o uso. Entretanto, quando passam por modificações químicas ou incorporam nanopartículas, passam a integrar o ciclo técnico, no qual é fundamental planejar sua regeneração, reuso ou reciclagem para que permaneçam em circulação e não sejam descartados.

Dessa forma, o diagrama proposto pela Ellen MacArthur Foundation (Ellen MacArthur Foundation, 2024) não apenas ilustra a interconexão entre os sistemas naturais e industriais, mas também reforça a importância de projetar produtos e processos que respeitem os princípios da circularidade. No caso dos biossorventes, essa perspectiva revela uma

oportunidade de unir avanços tecnológicos à sustentabilidade, promovendo a valorização de resíduos e a redução de impactos ambientais, dentro de uma visão mais ampla de desenvolvimento regenerativo e sustentável.

Diferentemente do modelo linear, em que os resíduos são vistos como passivos ambientais, a economia circular propõe a reinserção desses subprodutos em novos ciclos produtivos, reduzindo a demanda por matérias-primas virgens e mitigando impactos ambientais (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017). Além da dimensão ambiental, o paradigma da circularidade também envolve aspectos sociais e econômicos, uma vez que incentiva modelos produtivos mais resilientes, capazes de gerar valor a partir da redução de desperdícios e da inovação em processos (Tan; Lamers, 2021).

No contexto do tratamento de efluentes e da gestão de resíduos, a economia circular ganha relevância ao incentivar a valorização de subprodutos como insumos em processos tecnológicos. Os biossorventes se inserem nesse modelo como exemplo prático, pois permitem que resíduos agroindustriais, biomassas e outros materiais de baixo custo sejam reaproveitados em processos de descontaminação, promovendo tanto benefícios ambientais quanto oportunidades econômicas (Madelá; Skuza, 2021). Assim, a integração entre biossorventes e economia circular representa um campo de estudo interdisciplinar, em que ciência dos materiais, sustentabilidade e economia se encontram para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos.

2 OBJETIVOS

- Avaliar em que medida a dimensão da circularidade aparece nas publicações, se apenas como contextualização, como estimativas preliminares ou como análises detalhadas.
- Discutir de que maneira os estudos relacionam os aspectos econômicos com os ambientais e sociais, em consonância com os princípios da sustentabilidade e da economia circular.
- Propor uma abordagem pedagógica para a aplicação da temática no Ensino da Química.

3 METODOLOGIA

De acordo com Brignardello-Petersen, Santesso e Guyatt (2025), as revisões sistemáticas são reconhecidas como o método mais rigoroso e transparente para sintetizar evidências científicas, permitindo que resultados de diferentes estudos sejam analisados e comparados de maneira estruturada. A principal característica desse tipo de revisão é a existência de um protocolo metodológico pré-definido, que estabelece de forma clara a pergunta de pesquisa, os critérios de inclusão e exclusão, as estratégias de busca e os procedimentos de análise dos dados. Essa padronização tem como objetivo minimizar vieses, aumentar a reprodutibilidade e garantir que a seleção dos estudos seja imparcial e baseada em evidências.

Esta revisão sistemática foi conduzida de natureza qualitativa e interpretativa com o objetivo de responder à seguinte questão de pesquisa: “De que maneira a dimensão econômica do uso de biossorventes para remoção de poluentes é abordada na literatura científica?”. Para isso, foram definidos critérios de inclusão e exclusão, palavras-chave e base de dados específica, conforme descrito nas seções seguintes.

Além da análise dos temas centrais, os artigos foram também classificados quanto à ênfase dada nas dimensões da sustentabilidade: ambiental e social. Essa categorização buscou identificar quais aspectos são mais frequentemente abordados na literatura sobre biossorventes, permitindo compreender se a economia é tratada de forma superficial, apenas para contextualização, ou de maneira aprofundada, como parte central das discussões.

3.1 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A revisão sistemática foi conduzida em base de dados científicas reconhecidas, *Web of Science*, utilizando como palavras-chave combinadas os termos “biosorbents” e “circular economy”. O período de busca considerou 35 publicações até o dia 07 de julho de 2025, sem restrição inicial quanto à data mínima de publicação, com o objetivo de contemplar tanto os estudos mais recentes quanto aqueles que fundamentam o desenvolvimento do tema.

3.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Foram incluídos artigos que:

(I) abordassem a aplicação de biossorventes na remoção de contaminantes em meio aquoso;

(II) apresentassem, em algum nível, discussões relacionadas à economia circular, seja no âmbito conceitual, tecnológico, econômico ou ambiental;

(III) estivessem disponíveis em texto completo nas bases consultadas.

Foram excluídas publicações duplicadas e aqueles que não estavam disponíveis em acesso aberto.

3.3 SELEÇÃO DOS ESTUDOS

A partir da aplicação dos critérios de busca, foram inicialmente identificados 35 artigos. Após a leitura dos títulos e resumos, realizou-se uma triagem para verificar a adequação ao escopo do trabalho. Em seguida, os textos completos, quando necessário, foram analisados para confirmar a pertinência e garantir que atendessem aos critérios de inclusão estabelecidos.

3.4 ORGANIZAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Para sistematizar as informações, elaborou-se uma tabela comparativa contendo as principais variáveis extraídas de cada estudo. Foram organizados dados referentes a: (I) autor/ano, (II) palavras-chave, (III) periódico, (IV) título, (V) tipo de biossorvente empregado, (VI) contaminante tratado, (VII) abordagem dada à dimensão econômica (se superficial ou aprofundada) e (VIII) Dimensão Predominante (Ambiental/Social/Econômica). Também foram adicionadas observações relevantes que permitissem destacar contribuições, inovações ou lacunas de cada pesquisa.

Essa organização possibilitou a análise crítica da literatura, permitindo identificar tendências na forma como a economia é tratada nos estudos relacionados a biossorventes. Além disso, a utilização de uma tabela (Apêndice 1) forneceu maior clareza na comparação entre trabalhos, facilitando a verificação de padrões e divergências.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos a partir da revisão sistemática da literatura.

Os dados extraídos estarão dispostos na tabela 1, presente no Apêndice 1, permitindo visualizar de forma clara e organizada os temas centrais de cada estudo, os tipos de

biossorventes empregados, os contaminantes tratados e a forma como a economia é integrada. Essa abordagem fornece uma base estruturada para a análise crítica e para a discussão sobre as lacunas existentes na literatura, especialmente no que diz respeito à exploração econômica do uso de biossorventes.

4.1 PANORAMA GERAL DA AMOSTRA

A amostra final desta revisão é composta por 35 artigos selecionados conforme os critérios descritos anteriormente. Os periódicos representados ocupam áreas diversas, como ciência dos materiais, engenharia ambiental, química aplicada e sustentabilidade, o que evidencia a natureza interdisciplinar do tema. Observou-se concentração de publicações no quinquênio mais recente (2020–2025), refletindo atenção crescente da comunidade científica para soluções baseadas em resíduos e para o enquadramento dessas soluções em modelos de circularidade.

Do ponto de vista dos materiais estudados, predominam resíduos agroindustriais e lignocelulósicos (cascas, bagaços, sementes, biochars), seguidos por biossorventes de origem microbiana e subprodutos biogênicos (exopolissacarídeos, quitina de insetos) e, em menor proporção, por materiais modificados e nanoestruturados. Essa distribuição indica uma forte preferência por matrizes que combinam disponibilidade, baixo custo e potencial de valorização dentro de cadeias circulares.

4.2 CONTAMINANTES E ALVOS DE ESTUDO

Os contaminantes mais frequentemente abordados nos artigos são metais pesados (por exemplo, Cu, Zn, Cd, Pb, Ni) e corantes sintéticos, seguidos por classes mais específicas como fármacos e micotoxinas. Essa prioridade é coerente com os impactos ambientais e riscos à saúde pública atribuídos a esses grupos de poluentes, bem como com a maior facilidade experimental de quantificação em estudos laboratoriais.

4.3 COMO A DIMENSÃO ECONÔMICA É TRATADA NA LITERATURA

Um dos objetivos centrais desta revisão foi avaliar em que nível a dimensão econômica, incluindo a relação de como a economia circular, aparece nos estudos sobre

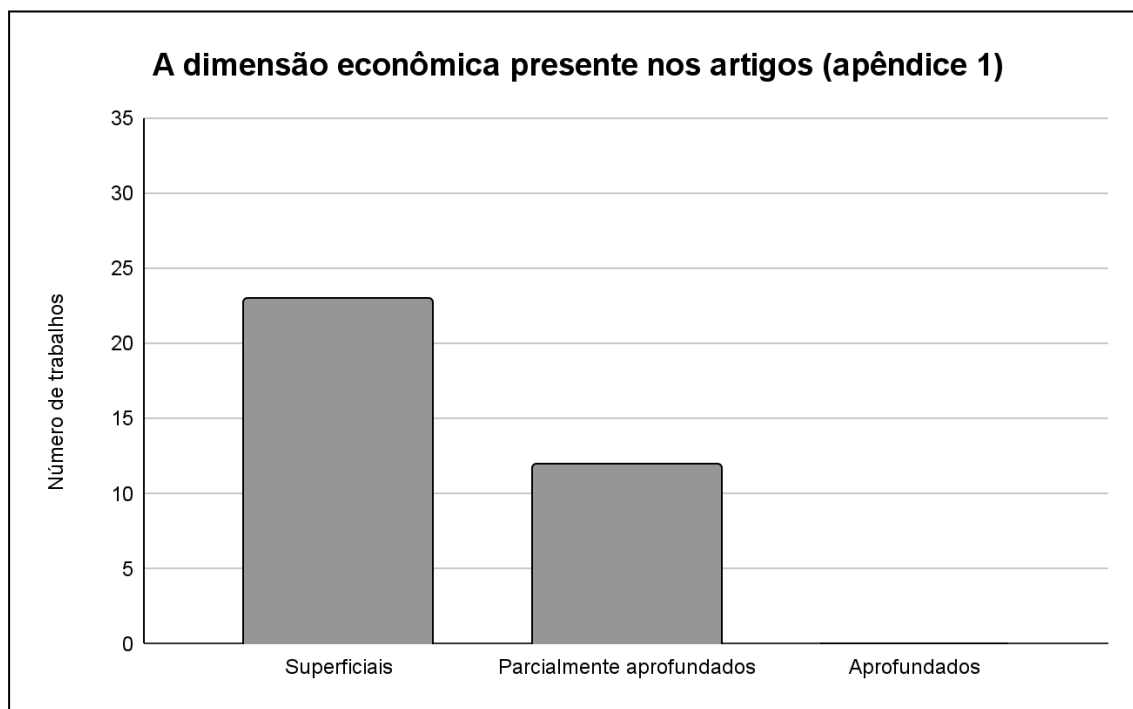
biossorventes. A partir das classificações realizadas na tabela 1 (apêndice 1), constatou-se a seguinte distribuição:

Vinte e três (23) artigos ($\approx 66\%$) apresentam uma abordagem superficial da dimensão econômica: a economia circular aparece como justificativa conceitual ou o baixo custo do resíduo é mencionado de forma qualitativa, sem análise econômica propriamente dita.

Doze (12) artigos ($\approx 34\%$) foram classificados como parcialmente aprofundados: além da justificativa conceitual, esses trabalhos discutem elementos operacionais ou de viabilidade (por exemplo, custos relativos, comparações qualitativas, análise de escalabilidade em coluna fixa, ou considerações sobre custo operacional para pequenos produtores), sem, contudo, promover avaliações econômicas completas.

Nenhum artigo (0%) foi classificado como aprofundado na dimensão econômica, uma vez que nenhum deles apresentou estimativas monetárias explícitas ou métricas financeiras completas, como CAPEX, OPEX ou análises de ciclo de vida (LCA). Embora alguns trabalhos tenham discutido aspectos de viabilidade técnica, baixo custo relativo ou potenciais ganhos indiretos, como a reutilização da água do processo ou a recuperação de metais estratégicos em rejeitos (Lemos et al., 2023), essas abordagens permanecem no nível parcialmente aprofundado, sem alcançar o rigor quantitativo necessário para caracterizar um estudo como verdadeiramente aprofundado.

Gráfico 1: Representação dos resultados obtidos da análise dos artigos presentes no apêndice 1. Fonte: elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A maioria dos trabalhos limita-se a tratar a dimensão econômica de forma superficial, por meio de justificativas conceituais ou menções genéricas ao baixo custo e à valorização de resíduos. Em cerca de um terço da amostra, observou-se uma abordagem parcialmente aprofundada, na qual os autores discutem aspectos de viabilidade técnica ou comparações qualitativas de custos, sem, contudo, apresentar dados financeiros robustos. Essa constatação evidencia uma lacuna significativa na literatura: apesar da abundância de estudos técnicos e ambientais sobre biossorventes e valorização de resíduos, análises econômicas detalhadas ainda são inexistentes, reforçando a necessidade de pesquisas futuras que incorporem métricas financeiras para validar a viabilidade da biovalorização em contextos de economia circular.

4.4 NATUREZA DAS ABORDAGENS: PADRÕES E LACUNAS

4.4.1 Abordagens superficiais predominantes (técnico-ambientais)

A análise da amostra evidencia que a maioria dos estudos apresenta caráter predominantemente técnico e ambiental, com foco na caracterização físico-química dos biossorventes e na eficiência de remoção dos contaminantes. Entre os trinta e cinco artigos analisados, vinte e três enquadram-se nessa categoria, apresentando abordagem superficial quanto à dimensão econômica. Esses trabalhos priorizam métodos de caracterização como BET (Brunauer-Emmett-Teller), FTIR (Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier), MEV/SEM (Microscopia Eletrônica de Varredura) e DRX (Difração de Raios X), modelagem de isoterma e cinéticas de adsorção, e ensaios em batelada para quantificação da capacidade adsorptiva. A discussão econômica, quando presente, restringe-se geralmente à menção do baixo custo dos resíduos ou à simplicidade do processo, sem detalhar custos de produção, regeneração, demanda energética ou indicadores financeiros. Esse padrão revela que, embora o discurso da economia circular esteja amplamente incorporado como contextualização teórica, a quantificação econômica ainda não é tratada de maneira sistemática.

4.4.2 Estudos parcialmente aprofundados: contribuições metodológicas

Os doze artigos classificados como parcialmente aprofundados apresentam contribuições importantes para a transição entre o estudo laboratorial e a aplicação em escala piloto. Esses trabalhos exploram aspectos como eficiência energética, escalabilidade em sistemas de leito fixo, custos operacionais comparativos e viabilidade de uso por pequenos produtores rurais. Ainda que não realizem análises econômicas completas, eles trazem uma visão mais próxima da aplicabilidade real, discutindo parâmetros que podem influenciar a viabilidade financeira. Assim, esses estudos representam uma etapa intermediária relevante entre o discurso teórico e a implementação prática de tecnologias de biossorção sustentáveis.

4.4.3 Ausência de estudos aprofundados: impacto e implicações

Nenhum artigo apresentou análises efetivamente aprofundadas da dimensão econômica. Não foram encontrados trabalhos que integrassem métodos quantitativos e abordagens multidimensionais, como Avaliação de Ciclo de Vida (LCA), estimativas de

custos (CAPEX e OPEX) ou quantificação sistemática do valor recuperável de materiais estratégicos e rejeitos. Essa ausência demonstra que, embora a bioressorção seja amplamente investigada sob perspectivas técnicas e ambientais, sua viabilidade econômica permanece pouco explorada. A lacuna reforça a necessidade de futuros estudos que incorporem métricas financeiras robustas e modelos de gestão baseados na circularidade, de modo a avaliar de forma integrada o potencial econômico e ambiental da tecnologia.

4.4.4 Lacunas identificadas

A análise comparativa dos estudos permite identificar lacunas significativas na literatura atual. A principal delas é a ausência de análises econômicas quantitativas, uma vez que nenhum dos artigos avaliados apresentou métricas padronizadas de custo e retorno, como CAPEX, OPEX ou estimativas financeiras detalhadas. Também não foram encontrados trabalhos que integrem a Avaliação de Ciclo de Vida (LCA) às dimensões econômicas, o que permitiria uma visão mais completa da circularidade. Observa-se ainda a falta de padronização metodológica na forma de relatar custos e indicadores econômicos, dificultando comparações entre diferentes pesquisas. Outra lacuna importante refere-se à escassez de estudos em escala piloto, capazes de fornecer dados reais de desempenho e regeneração do bioressorvente, aspectos essenciais para confirmar a circularidade técnica e econômica. Por fim, a dimensão social permanece pouco explorada, embora represente um componente fundamental da economia circular, especialmente no contexto da geração de emprego, inclusão produtiva e aceitação social de tecnologias sustentáveis.

4.5 RELAÇÃO BIOSSORÇÃO × ECONOMIA CIRCULAR: INTERPRETAÇÃO CRÍTICA

A análise integrada dos artigos permitiu observar que a relação entre bioressorção e economia circular é amplamente reconhecida na literatura científica, mas nem sempre abordada de forma mensurável. Em grande parte dos estudos, a economia circular é mencionada como um princípio norteador, servindo para contextualizar a importância do aproveitamento de resíduos e a sustentabilidade ambiental dos processos. Entretanto, a efetiva aplicação dos seus fundamentos, especialmente no que se refere à regeneração de materiais, reaproveitamento energético e criação de cadeias de valor, ainda é restrita a um número limitado de pesquisas.

Os estudos analisados revelam que os bioissorventes se enquadram majoritariamente no diagrama da Borboleta (imagem 1), proposto pela Ellen MacArthur Foundation (2013), uma vez que são obtidos a partir de matérias-primas de origem natural, como resíduos agroindustriais, biomassas vegetais e subprodutos biogênicos. Esses materiais, por serem biodegradáveis e renováveis, podem retornar de forma segura à natureza após o uso, seja por compostagem ou decomposição natural. Contudo, quando os bioissorventes passam por processos de modificação química, impregnação metálica ou incorporação de nanopartículas em sua estrutura, passa-se a ter um olhar cauteloso, o que exige estratégias de recuperação, reuso ou reciclagem para evitar que se tornem novos passivos ambientais.

Nesse sentido, o conceito de circularidade aplicado à bioissorção implica não apenas o reaproveitamento de resíduos como matéria-prima, mas também a reinserção desses materiais no ciclo produtivo após sua utilização. Tal abordagem está alinhada ao princípio de “fechamento de ciclo”, segundo o qual os materiais devem manter-se em circulação pelo maior tempo possível, reduzindo a extração de recursos virgens e a geração de rejeitos. Assim, os processos de regeneração de bioissorventes e a recuperação de contaminantes com valor comercial, como metais pesados e elementos de terras raras, representam formas tangíveis de aplicar a economia circular a tecnologias ambientais.

Entretanto, verificou-se que nenhum estudo demonstrou esse fechamento de ciclo de forma completa. A maioria das pesquisas se limita à etapa de adsorção, sem abordar o destino do bioissorvente após o uso ou propor estratégias sistemáticas de regeneração e reaproveitamento. Essa limitação reforça a necessidade de que futuros estudos integrem, desde a concepção experimental, estratégias de regeneração e reutilização, permitindo quantificar de forma mais precisa o desempenho circular dos processos.

Outro ponto relevante é que, embora a dimensão ambiental seja amplamente explorada, a dimensão econômica permanece, em grande parte, implícita ou superficial. Isso indica uma lacuna conceitual entre a teoria da economia circular e sua aplicação prática nos estudos de bioissorção. Para que essa tecnologia se insira efetivamente em modelos circulares, é indispensável que sejam incorporadas análises econômicas padronizadas, como custo por unidade tratada, valor recuperável e eficiência de regeneração, de modo a demonstrar o retorno financeiro e a viabilidade de implementação em escala industrial.

Por fim, destaca-se que a bioissorção, quando contextualizada dentro dos princípios da economia circular, representa uma interdisciplinaridade conectada à convergência entre ciência dos materiais, sustentabilidade e economia verde. A valorização de resíduos agroindustriais como insumos tecnológicos exemplifica um modelo regenerativo de produção, que prescreve inovação, redução de impactos ambientais e geração de valor. Todavia, para que essa interdisciplinaridade se concretize, é necessário ultrapassar a aplicação conceitual para a implementação prática de fato, desenvolvendo métricas e metodologias que comprovem a circularidade e a viabilidade econômica em cada etapa do processo.

4.6 IMPLICAÇÕES PARA PESQUISA FUTURA E PARA A PRÁTICA

A partir das lacunas identificadas na literatura, torna-se evidente que há um caminho significativo a ser percorrido para que a bioissorção seja plenamente reconhecida como uma tecnologia circular e economicamente viável. Embora a maioria dos estudos demonstre elevado rigor técnico na caracterização e na modelagem dos processos adsorptivos, a ausência de análises econômicas quantitativas limita a compreensão do real potencial de aplicação desses sistemas em escala industrial.

Dessa forma, as futuras pesquisas devem priorizar a ligação entre a avaliação técnico-ambiental e a análise econômica, de modo a quantificar indicadores que expressem não apenas a eficiência de remoção, mas também o desempenho financeiro do processo.

Ferramentas como o Custo de Investimento de Capital (CAPEX) e o Custo Operacional (OPEX), ainda não utilizadas nos estudos analisados, são essenciais para estimar a viabilidade do uso de bioissorventes em larga escala.

Outra recomendação relevante é a ampliação do uso da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), associada à análise econômica, permitindo uma visão holística dos impactos ambientais e financeiros ao longo de todas as etapas do processo, desde a obtenção do bioissorvente até a sua regeneração ou descarte final. A combinação entre LCA e análise econômica também pode auxiliar na identificação de gargalos de eficiência, direcionando esforços de pesquisa e desenvolvimento para etapas mais críticas do ciclo produtivo.

Além disso, recomenda-se uma abordagem interdisciplinar, que integre engenheiros de processo, economistas e especialistas em políticas públicas, a fim de traduzir os avanços laboratoriais em soluções economicamente viáveis e socialmente aceitas. A inclusão da dimensão social é igualmente necessária, considerando o potencial de geração de emprego, inclusão de comunidades rurais e valorização de cadeias produtivas locais, aspectos que fortalecem a sustentabilidade e a resiliência econômica associadas à economia circular.

Por fim, destaca-se a importância de padronizar metodologias de avaliação econômica e de circularidade, estabelecendo indicadores comparáveis entre diferentes estudos. Essa uniformização permitirá a construção de bases de dados mais consistentes, capazes de sustentar políticas públicas e decisões industriais voltadas à adoção de tecnologias limpas e regenerativas baseadas em biossorventes.

No contexto da circularidade, o trabalho propõe, ainda, a elaboração de uma proposta pedagógica para o Ensino Médio, no âmbito da Química Verde e da aplicação de biossorventes, com o intuito de explorar os conceitos desta abordagem de desenvolvimento sustentável.

5 PROPOSTA PEDAGÓGICA

A presente proposta pedagógica tem como objetivo promover uma reflexão crítica sobre o modelo de produção e consumo vigente, destacando a necessidade de transição para práticas sustentáveis pautadas nos princípios da economia circular. Essa perspectiva visa compreender o ciclo de vida dos materiais e produtos, propondo estratégias de redução de resíduos e valorização de recursos por meio da reutilização, reciclagem e reaproveitamento de materiais.

O ponto de partida da proposta é o documentário “Lixo Extraordinário” (2010), dirigido por Lucy Walker, que retrata o trabalho do artista brasileiro Vik Muniz com catadores de materiais recicláveis no aterro sanitário de Jardim Gramacho, no Rio de Janeiro. O filme aborda questões ambientais, sociais e econômicas interligadas à destinação dos resíduos, permitindo que os estudantes reflitam sobre o valor social e simbólico do lixo, a inclusão de grupos marginalizados e o papel da arte e da ciência na transformação da realidade.

Essa proposta insere-se no contexto da abordagem CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade), a qual busca romper com a visão fragmentada da ciência, aproximando o conhecimento científico das problemáticas cotidianas e promovendo o engajamento crítico

dos estudantes (Auler; Delizoicov, 2002). Nesse sentido, a Química é tratada como um instrumento de compreensão e transformação social, capaz de explicar fenômenos relacionados à degradação ambiental, ao reaproveitamento de materiais e à valorização de resíduos.

De modo complementar, a proposta também incorpora os princípios da teoria dos 5R's: repensar, recusar, reduzir, reutilizar e reciclar; que orienta práticas sustentáveis e está alinhada às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). Esses princípios buscam promover uma mudança de mentalidade em relação ao consumo, estimulando atitudes responsáveis diante do descarte e da gestão de resíduos.

- Repensar: avaliar o impacto de nossas escolhas de consumo e questionar hábitos que geram desperdício;
- Recusar: evitar produtos e práticas que gerem resíduos excessivos ou que não sejam sustentáveis;
- Reduzir: consumir de forma consciente, diminuindo a quantidade de resíduos gerados;
- Reutilizar: dar novos usos a produtos e materiais que ainda tenham valor funcional;
- Reciclar: transformar resíduos em novos produtos ou matérias-primas, reinserindo-os no ciclo produtivo.

A articulação entre a economia circular e os 5R's reforça a ideia de que o lixo pode deixar de ser um passivo ambiental e tornar-se um recurso de valor, contribuindo para a redução da exploração de matérias-primas e para a redução dos impactos ambientais. Essa perspectiva dialoga diretamente com o conceito de desenvolvimento sustentável, definido pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), no relatório Nosso futuro comum (1987) como aquele que atende às necessidades do presente momento sem comprometer a capacidade das gerações futuras.

Por meio dessa proposta, pretende-se desenvolver nos estudantes uma postura ativa e reflexiva em relação ao consumo e ao descarte, incentivando-os a compreender o papel da ciência e da tecnologia na construção de um futuro sustentável. A abordagem busca também promover a alfabetização científica e o pensamento crítico, em consonância com a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que propõe o desenvolvimento de competências voltadas à sustentabilidade, à argumentação fundamentada e à cidadania ambiental (Brasil, 2018).

Desse modo, o trabalho pedagógico proposto vai além da dimensão cognitiva: busca formar cidadãos capazes de relacionar o conhecimento químico à realidade social e ambiental em que vivem, desenvolvendo valores éticos, críticos e solidários. Ao conectar a arte, a ciência e a cidadania, a proposta proporciona uma experiência educativa interdisciplinar que evidencia a transformação ambiental, além de uma transformação social e cultural.

5.1 OBJETIVOS

Compreender os princípios da economia circular e sua relação com o aproveitamento de resíduos, por meio de aulas expositivas, participativas e da análise crítica do documentário “Lixo Extraordinário”, relacionando o tema à Química e à sustentabilidade social e ambiental.

I) Discutir o conceito de economia circular e sua diferença em relação ao modelo tradicional linear de produção e consumo;

II) Relacionar o reaproveitamento de resíduos à química dos materiais e à sustentabilidade ambiental;

III) Desenvolver o pensamento crítico e a consciência social sobre o papel dos indivíduos e comunidades na gestão de resíduos e inclusão social;

IV) Promover o diálogo entre arte, ciência e cidadania, reconhecendo a valorização de resíduos como ação transformadora.

5.2 CONTEÚDOS

A sequência didática será realizada a partir da exploração dos seguintes conteúdos:

- Economia linear x economia circular
- Sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos
- Química ambiental e impacto dos materiais no meio ambiente
- Arte e ciência na transformação de resíduos
- Valorização social e inclusão de catadores
- Papel social da ciência

A proposta pedagógica está em consonância com as Competências e Habilidades da Área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias do Novo Ensino Médio (São Paulo, 2025).

5.3 METODOLOGIA

A proposta será desenvolvida ao longo de nove aulas de 50 minutos, baseando-se nos princípios da teoria dos Três Momentos Pedagógicos (Delizoicov & Angotti, 1994): problematização inicial, organização do conhecimento/ideias e aplicação do conhecimento.

5.3.1 Primeiro Momento: Problematização Inicial

Duração: 2 aulas

O professor inicia com uma conversa diagnóstica, questionando os alunos:

- O que acontece com o lixo depois que é descartado?
- Você já ouviu falar em Economia Circular? O que vocês acham que é Economia Circular?
- O lixo pode ter valor?

Após a discussão, será exibido o documentário “Lixo Extraordinário”, de Lucy Walker (2010), que retrata o trabalho do artista brasileiro Vik Muniz com catadores de materiais recicláveis no aterro sanitário de Jardim Gramacho (RJ).

Durante a exibição, os alunos serão orientados a anotar aspectos que chamem a atenção sobre:

- A relação entre arte e meio ambiente;
- As condições de trabalho e a dimensão social da reciclagem;
- O destino dos resíduos e o potencial de reaproveitamento dos materiais.

5.3.2 Segundo Momento: Organização do Conhecimento

Duração: 3 aulas

Após o primeiro momento, o professor promove um debate mediado, ensinando e/ou retomando os conceitos científicos envolvidos.

Serão discutidos:

- Os materiais presentes nos resíduos (plásticos, metais, vidros, orgânicos);
- Os processos químicos de decomposição e reciclagem;
- A diferença entre o modelo linear (extrair-produzir-descartar) e o modelo circular (reduzir-reutilizar-reciclar);
- O papel da química na valorização de resíduos (biossorventes, compostagem, recuperação de metais, entre outros).

O professor apresenta o Diagrama de Borboleta da Economia Circular (Ellen MacArthur Foundation, 2024), explicando os ciclos biológico e técnico, e conduz a turma a identificar em qual deles se enquadrariam as práticas vistas no documentário.

5.3.3 Terceiro Momento: Aplicação do Conhecimento

Duração: 4 aulas

Idealização e Projeto de Intervenção (Aulas 1 e 2):

Os alunos serão divididos em três grupos para propor ideias práticas de Economia Circular aplicáveis à escola ou à comunidade, baseadas nos conceitos de valorização de resíduos e inovação (conhecimento adquirido no Momento 2).

Exemplos de Projetos:

- Desenvolvimento de um sistema de compostagem escolar para resíduos orgânicos (Grupo 1).
- Proposta de reutilização criativa de um resíduo específico (como cascas de amendoim ou serragem, que são materiais testados para bioissorção) para fins artísticos ou funcionais (Grupo 2).
- Criação de um plano de coleta seletiva e destinação de lixo eletrônico ou outros resíduos complexos (Grupo 3).

Cada grupo deverá detalhar sua proposta, incluindo: o resíduo alvo, a solução tecnológica (simples), o impacto social e o benefício ambiental.

Apresentação e Avaliação Crítica (Aula 3):

Cada grupo apresentará sua proposta para a turma.

O professor conduzirá a discussão para que os próprios alunos avaliem as propostas, focando em três dimensões:

- Viabilidade Técnica/Científica: A solução funciona? Quais princípios químicos/biológicos garantem sua eficácia (relação com o Momento 2)?
- Benefício Social: A solução ajuda as pessoas ou a comunidade? É justa? (Relacionamento com o conceito de Desenvolvimento Sustentável).
- Impacto Ambiental e Econômico: Como a solução reduz o lixo/poluição e valoriza o resíduo (Economia Circular)? Ela é de baixo custo?

O professor encerrará o ciclo de três momentos, destacando que as propostas desenvolvidas pelos alunos mostram que o conhecimento científico e as novas tecnologias não servem apenas para responder a provas, mas sim para melhorar a vida das pessoas e

proteger o ambiente. O professor reforçará que a participação de cada um é a chave para transformar a sociedade em um modelo mais sustentável, mais justo e com menos desperdício (aplicação prática dos princípios do CTS).

Atividade Experimental: Remoção de Corantes por Adsorção em Carvão Ativado (Aula 4):

Como estratégia complementar de aplicação prática do conhecimento, será realizada uma atividade experimental demonstrativa envolvendo a remoção de corantes em meio aquoso por meio de adsorção em carvão ativado. Essa prática tem como objetivo permitir que os estudantes visualizem, de forma concreta, o processo de descontaminação da água, relacionando conceitos químicos discutidos anteriormente às problemáticas ambientais abordadas ao longo da sequência didática.

Inicialmente, o professor apresentará uma solução aquosa contendo corante alimentício ou corante sintético de fácil acesso, simulando a presença de contaminantes em águas residuais. Em seguida, será adicionado carvão ativado comercial à solução, promovendo a agitação do sistema por tempo determinado. Após a etapa de contato, a mistura será submetida à filtração simples, permitindo observar a redução significativa da coloração da água.

Durante a atividade, os estudantes serão estimulados a refletir sobre os seguintes aspectos:

- O papel da adsorção como processo físico-químico de remoção de contaminantes;
- A atuação do carvão ativado como material adsorvente, destacando sua elevada área superficial;
- A analogia entre o experimento e situações reais de tratamento de água e efluentes;
- As limitações do método, como saturação do adsorvente e necessidade de regeneração ou descarte adequado.

A prática experimental será discutida à luz dos princípios da economia circular, ressaltando que materiais como o carvão ativado podem ser obtidos a partir de resíduos (por exemplo, biomassa vegetal ou resíduos agroindustriais), conectando o experimento às discussões sobre biossorventes, reaproveitamento de resíduos e valorização de subprodutos. Dessa forma, os estudantes poderão compreender que soluções tecnológicas para problemas ambientais podem ser simultaneamente simples, eficientes e sustentáveis.

Além disso, a atividade contempla habilidades previstas na BNCC para o Ensino Médio (Brasil, 2018), tais como:

- EM13CNT301 – Analisar e explicar fenômenos naturais e processos tecnológicos com base em modelos científicos, como o processo de adsorção utilizado na remoção de contaminantes da água;
- EM13CNT302 – Avaliar tecnologias e processos produtivos relacionados ao uso de materiais e à geração de resíduos, considerando critérios de sustentabilidade e impacto ambiental;
- EM13CNT305 – Propor soluções para problemas ambientais locais ou globais, articulando conhecimentos científicos, tecnológicos e sociais, como no desenvolvimento de alternativas de baixo custo para tratamento de água;
- EM13CNT306 – Argumentar sobre intervenções humanas no ambiente, considerando riscos, benefícios e limites das tecnologias disponíveis.

Ao final da atividade, os alunos serão convidados a relacionar o experimento com os projetos de intervenção desenvolvidos pelos grupos, avaliando como processos semelhantes poderiam ser adaptados para contextos reais de baixo custo, como filtros caseiros ou sistemas alternativos de tratamento de água. Essa etapa reforça a integração entre ciência, tecnologia e sociedade, consolidando o aprendizado por meio da aplicação prática do conhecimento químico em situações socialmente relevantes.

5.4 RECURSOS DIDÁTICOS

- Sala de aula com projetor e sistema de som;
- Acesso ao documentário Lixo Extraordinário (disponível em plataformas online);
- Quadro, pincéis e cartolinas;
- Materiais recicláveis para oficinas (papel, plástico, alumínio, etc.);
- Slides explicativos sobre economia circular e química ambiental;
- Materiais para a atividade experimental, incluindo:
 - carvão ativado comercial;
 - corante alimentício ou corante sintético de baixo risco;
 - béqueres ou copos transparentes;
 - colheres ou bastões de agitação;
 - funil e papel de filtro;
 - frascos ou garrafas PET reutilizadas.

5.5 RESULTADOS ESPERADOS

Com a estruturação desta sequência didática com base nos Três Momentos Pedagógicos, espera-se promover o estabelecimento de uma nova concepção de sustentabilidade por parte dos alunos, a partir de um protagonismo investigativo em que os problemas ambientais locais tornam-se o objeto de estudo da turma.

Os momentos de problematização inicial e organização do conhecimento devem ser capazes de estimular um diálogo crítico em torno das externalidades negativas da atividade econômica e da poluição, buscando-se compreender o papel da Química na busca por soluções. Nesse contexto, o conhecimento sobre biossorventes e a valorização de resíduos (como agro-resíduos) atua como um elemento-chave que capacita o aluno a reconhecer o potencial da inovação tecnológica para a construção da Economia Circular.

No momento de aplicação do conhecimento, espera-se que os alunos formalizem propostas de intervenção prática aplicáveis ao ambiente escolar ou à comunidade, como a reutilização de materiais, a criação de sistemas de gestão de resíduos ou o desenvolvimento de protótipos de valorização de descarte (como filtros de baixo custo). Tais projetos visam a ampliação da visão interdisciplinar e a construção de atitudes cidadãs voltadas à sustentabilidade e ao consumo responsável. Por fim, estas propostas podem ser formalizadas em um documento e apresentadas à gestão da escola, consolidando uma prática compartilhada de responsabilidade social e ambiental, na qual a ciência serve diretamente ao bem-estar coletivo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises desenvolvidas ao longo deste trabalho evidenciam que, embora a bioissorção apresente amplo reconhecimento científico como tecnologia ambientalmente promissora, sua inserção efetiva no paradigma da economia circular ainda ocorre de forma limitada. A maior parte dos estudos concentra-se em abordagens conceituais, ressaltando o baixo custo, a origem renovável e o potencial ambiental dos bioissorventes, mas sem avançar na quantificação de indicadores econômicos que permitam avaliar sua viabilidade em escala aplicada. Uma parcela menor da literatura já aponta caminhos ao integrar aspectos técnicos, ambientais e financeiros, demonstrando o potencial da bioissorção como estratégia de valorização de resíduos e recuperação de recursos, ainda que permaneça evidente a lacuna de estudos com avaliações econômicas aprofundadas.

Nesse contexto, a consolidação da bioissorção como alternativa competitiva às tecnologias convencionais depende do fortalecimento da interface entre ciência dos materiais, engenharia de processos e economia, de modo a transformar propostas conceituais em soluções tecnicamente eficientes, economicamente viáveis e socialmente relevantes. Essa integração é fundamental para que a bioissorção deixe de ser apenas uma opção ambientalmente atrativa e passe a configurar-se como uma tecnologia circular e regenerativa, alinhada aos objetivos do desenvolvimento sustentável.

Em consonância com essa perspectiva, a proposta pedagógica apresentada amplia o alcance da discussão ao transpor os princípios da economia circular e da valorização de resíduos para o contexto do ensino de Química. Ao articular conceitos científicos, questões socioambientais e práticas educativas alinhadas à BNCC, a sequência didática proposta favorece uma aprendizagem contextualizada e crítica, estimulando os estudantes a compreenderem o papel da química na transformação de materiais, no reaproveitamento de resíduos e na mitigação de impactos ambientais. Dessa forma, o trabalho contribui não apenas para o avanço da discussão acadêmica sobre bioissorventes e economia circular, mas também para a formação de sujeitos mais conscientes, capazes de relacionar ciência, tecnologia e sociedade em uma perspectiva sustentável e cidadã.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL MAKSOU, M. I. A. *et al.* Insight on water remediation application using magnetic nanomaterials and biosorbents. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 403, p. 213096, 2020.

AHMED, M. J.; HAMEED, B. H. Removal of emerging pharmaceutical contaminants by adsorption in a fixed-bed column: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 149, p. 257–266, 2018.

ALOMÁ, I. L. C.; RODRÍGUEZ, I.; CALERO, M.; BLÁZQUEZ, G. Biosorption of Cr⁶⁺ from aqueous solution by sugarcane bagasse. **Desalination and Water Treatment**, v. 52, n. 26–28, p. 5912–5922. 2014.

ALVARADO, M. C. Marang fruit (*Artocarpus Odoratissimus*) waste: A promising resource for food and diverse applications: A review of its current status, research opportunities, and future prospects. **Food Bioengineering**, 2023.

ARAÚJO, R. O. *et al.* Biochar from lignocellulosic biomass: a sustainable circular economy approach for removing organic and inorganic contaminants. **Química Nova**, Manaus, v. 47, n. 10, e-20240079, 2024.

AULER, D.; DELIZOICOV, D. Ciência-Tecnologia-Sociedade: Relações Estabelecidas por Professores de Ciências. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 4., 2002, Florianópolis. **Anais [do] IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**. Florianópolis: CED/UFSC, 2002. p. 1-13.

AUS DER BEEK, T. *et al.* Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 35, n. 4, p. 823–835, 2016.

BABALOLA, B. M.; WILSON, L. D. Valorization of Eggshell as Renewable Materials for Sustainable Biocomposite Adsorbents—An Overview. **Journal of Composites Science**, Basel, v. 8, n. 10, 414, 2024.

BAK, J. *et al.* Better Ce (III) Sorption Properties of Unprocessed Chitinous Waste from *Hermetia illucens* than Commercial Chitosans. **Materials**, Basel, v. 17, n. 21, 5255, 2024.

BOLONG, N. *et al.* A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. **Chemosphere**, v. 76, n. 5, p. 593–600, 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018.

BRIGNARDELLO-PETERSEN, R.; SANTESSO, N.; GUYATT, G. H. Systematic reviews of the literature: an introduction to current methods. **American Journal of Epidemiology**, v. 194, p. 536–542, 2025.

CHAUHAN, A. *et al.* Pristine Biosorbents to Composites: An Overview on Quality Assessment, Limitations, and Advancements Toward Wheat Straw Adsorbents for Wastewater Remediation. **ChemistrySelect**, v. 10, p 5-27, 2025.

CIANI, M. *et al.* Semi-continuous cultivation of EPS-producing marine cyanobacteria: A green biotechnology to remove dissolved metals obtaining metal-organic materials. **New Biotechnology**, v. 82, p. 33-42, 2024.

CIANI, M. *et al.* Exploring Metal Interactions with Released Polysaccharides from *Cyanothece* sp. CE4: A Chemical and Spectroscopic Study on Biosorption Mechanism. **Polymers, Basel**, v. 17, n. 371, 2025.

COLDEBELLA, P. F. *et al.* Exploring the eco-friendly potential of *Moringa oleifera* parts as biosorbents for atrazine removal. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 9, p. 6445–6458, 2024.

COLBORN, T.; VOM SAAL, F. S.; SOTO, A. M. Developmental effects of endocrine-disrupting chemicals in wildlife and humans. **Environmental Health Perspectives**, v. 101, n. 5, p. 378–384, 1993.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 1988.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A. **Metodologia do ensino de ciências**. São Paulo: Cortez, 1994.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition. **Ellen MacArthur Foundation**, 2013. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>>. Acesso em: 15 out. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. O diagrama de borboleta: visualizando a economia circular. **Ellen MacArthur Foundation**, 2021. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/o-diagrama-de-borboleta>>. Acesso em: 15 out. 2025.

FATIMA, R. *et al.* Bridging sustainability and industry through resourceful utilization of pea pods- A focus on diverse industrial applications. **Food Chemistry: X**, v. 23, 101518, 2024.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, T.; GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent developments in life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GUIMARÃES, B. Q. *et al.* Biosorbents Used to Remove Methylene Blue Dye in Aqueous Solutions: a environmental chemistry education propose. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 2, p. 154–166, 2021.

IJOMA, G. N. *et al.* Assessing biosorbent materials for antibacterial properties and filtration efficiency for potential application in wastewater treatment. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, p. 13085–13102, 2025.

IVANOVSKA, A. *et al.* Obtaining jute fabrics with enhanced sorption properties and "closing the loop" of their lifecycle. **Industrial Crops & Products**, v. 171, p. 113913, 2021.

INOUE, K. *et al.* Biosorbents for removing hazardous metals and metalloids. **Materials**, v. 10, n. 8, art. 857, 2017.

JOSHI, N. C. *et al.* Removal of heavy metals using cellulose-based materials: a mini-review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 21, p. 100942, 2024.

KARIĆ, N. *et al.* Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in)organic pollutants in wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 9, p. 100239, 2022.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

KÜMMERER, K. The presence of pharmaceuticals in the environment due to human use – present knowledge and future challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 8, p. 2354–2366, 2009.

LAGO, A.; SILVA, B.; TAVARES, T. Cleaner Approach for Atrazine Removal Using Recycling Biowaste/Waste in Permeable Barriers. **Recycling**, v. 6, n. 2, art. 41, 2021.

LEMOS, M. G. *et al.* Hydrochemistry, Elements Distribution and Their Potential Recoveries in Gold Metallurgical Treatment Tailings Dams. **Water**, v. 15, n. 2714, 2023.

MANNA, A. *et al.* A review on adsorption mediated phosphate removal and recovery by biomatrices. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 99, 100682. 2022.

MADEŁA, M.; SKUZA, M. Towards a Circular Economy: Analysis of the Use of Biowaste as Biosorbent for the Removal of Heavy Metals. **Energies**, v. 14, n. 5427, 2021.

MAICANEANU, A.; INDOLEAN, C. Investigation on the potential usage of lignocellulosic wastes for Cd(II) removal. **Studia UBB Chemia**, v. LXVII, n. 4, p. 109-120, 2022.

MENDONÇA, A. C. *et al.* Red-fleshed pitaya peels (*Hylocereus polyrhizus*) as a biosorbent for removal of hormone 17 α -methyltestosterone in aqueous medium. **Journal of Porous Materials**, v. 31, p. 809–830, 2024.

MIROS-KUDRA, P. *et al.* Removal of Zinc Ions from Aqueous Solutions with the Use of Lignin and Biomass Part II. **FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe**, v. 31, n. 2, 2023.

MIROS-KUDRAT, P.; SOBCZAK, P.; KOPANIA, E. Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions with the Use of Lignins and Biomass. **FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe**, v. 30, n. 2, p. 99-111, 2022.

MOUGA, T.; FERNANDES, L. B. The Red Seaweed Giant *Gelidium* (*Gelidium corneum*) for New Bio-Based Materials in a Circular Economy Framework. **Earth**, v. 3, p. 788-813, 2022.

NÚÑEZ-GÓMEZ, D. *et al.* Use of Biowaste for Sodium Removal in Mediterranean Irrigation Water: A Sustainable Approach. **Clean Technol.**, v. 7, n. 15, 2025.

OSMAN, A. I. *et al.* Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, p. 2337–2398, 2023.

PARK, D.; YUN, Y.-S.; PARK, J. M. The past, present, and future trends of biosorption. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 15, p. 86–102, 2010.

RACCUIA, S. G. M. *et al.* Multi-Analytical Approach for the Acid-Base, Thermal and Surface Properties Assessment of Waste Biomasses. **Molecules**, Basel, v. 29, n. 23, 5735, 2024.

RASHMI, N.; SALMATAJ, SA; KUMAR, P. Senthil; BHAT, Pushpanjali. Exploring chemically and physically modified plant-based fiber biomass for biosorption in wastewater treatment: A concise review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 67, p. 106245. 2024.

SANTOS, G. E. de S. dos. **Síntese de compósitos MgAl/HDL-biocarvão de ouricuri para aplicação na remoção de poluentes emergentes**. 2019. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Educação. **Currículo Paulista: Ensino Médio**. São Paulo: SEE/SP, 2020.

SHAH, A. J.; SONI, B.; KARMEE, S. K. Locally available agroresidues as potential sorbents: modelling, column studies and scale-up. **Bioresources and Bioprocessing**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 34, 2021.

SNYDER, S. A. *et al.* Pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disruptors in water: implications for the water industry. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 23, p. 545A–552A, 2003.

TAN, E. C. D.; LAMERS, P. Circular economy concepts—A perspective. **Frontiers in Sustainability**, v. 2, p. 701509, 2021.

TERNES, T. A. Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. **Water Research**, v. 32, n. 11, p. 3245–3260, 1998.

VERLICCHI, P.; AL AUKIDY, M.; ZAMBELLO, E. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment – A review. **Science of the Total Environment**, v. 429, p. 123–155, 2012.

VIDOVIX, T. B. *et al.* Efficient removal of sertraline hydrochloride from wastewater using banana peels functionalized: performance adsorption, mechanisms and applicability. **Environmental Technology**, v. 45. n. 11. p. 2119–2131. 2024.

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

WALKER, L. (Dir.). **Lixo Extraordinário**. Documentário. 2010. Reino Unido/Brasil: Almega Projects, 99 min.

XIE, J. Z.; CHANG, H-L.; KILBANE II, J.J. Removal and recovery of metal ions from wastewater using biosorbents and chemically modified biosorbents. **Bioresource Technology**, v. 57, p. 127-136. 1996.

YADAV, V. K. *et al.* Emerging Trends in the Valorization of Agricultural Waste and Their Utilization in Agricultural, Pharmaceuticals, and Environmental Cleanup. **Waste and Biomass Valorization**, Amsterdam, v. 16, p. 2779–2833, 2025.

YASIN, M.; GANGAN, S.; PANCHAL, S. K. Banana Peels: A Genuine Waste or a Wonderful Opportunity? **Applied Sciences**, Basel, v. 15, n. 6, p. 3195, 2025.

YOUNIS, A. M. *et al.* An innovative and environmentally benign approach involves the use of algae amino-modified nanoparticles to effectively remove phenol from water, resulting in considerable environmental benefits. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 68, n. 10, p. 669-679, 2025.

ZHANG, H-L.; CARRILLO-NAVARRETE, F.; PALET-BALLÚS, C. Human Hair Biogenic Fiber as a Biosorbent of Multiple Heavy Metals from Aqueous Solutions. **Journal of Natural Fibers**, [S. l.], v. 19, n. 6, p. 2018-2033, 2022.

APÊNDICE 1

Nº	Autor/Ano	Palavras-chave	Periódico	Título	Tipo de biossorvente	Contaminante tratado	Abordagem econômica	Dimensão predominante
1	BRUCKMANN, F. S.; FUHR, A. C. F. P.; OLIVEIRA, M. L. S.; et al., 2025.	Papaya seeds Pecan nutshells Rare earth elements Waste management Biomass valorization	Separation and Purification Technology	Recovery and concentration of Eu and Dy from real leachate using wastes as adsorbents: Standard adsorption study and fixed bed operation	Casca de noz-pecã e sementes de mamão (resíduos agroindustriais)	Elementos de terras raras (Európio – Eu ³⁺ e Disprósio – Dy ³⁺) em lixiviado de fosfogesso	Parcialmente aprofundada: O artigo apresenta aprofundamento técnico e discute aspectos de viabilidade (coluna fixa, incineração, eficiência em leachate real), mas não realiza análises econômicas quantitativas. Por isso, enquadra-se como parcialmente aprofundado na dimensão econômica.	Ambiental (valorização de resíduos e mitigação da poluição) com implicações econômicas (recuperação de elementos de alto valor comercial)
2	YASIN, M.; GANGAN, S.; PANCHAL, S. K., 2025	Banana waste; banana peel; bioactive compounds; phytochemicals; circular economy; waste recycle; food fortification	Applied Sciences	Banana Peels: A Genuine Waste or a Wonderful Opportunity?	Casca de banana	Não há um contaminante em específico, mas sim utilizações do biossorvente e sua importância	Superficial: O estudo traz várias menções à economia circular, mas sem análise financeira detalhada.	Ambiental (com forte conexão à economia circular)

3	ARAYA-SIBAJA, A. M. et al., 2025	Spent coffee grounds; methylene blue adsorption capacity; cationic dyes; wastewater; circular economy	Processes	Spent Coffee Ground-Based Materials Evaluated by Methylene Blue Removal	Borra de café	Corante (Azul de metileno)	Superficial: Inserção da economia circular por meio do aproveitamento de resíduos agroindustriais (bagaço de café gasto) como insumos úteis em processos de tratamento de efluentes, promovendo a valorização de subprodutos antes descartados.	Ambiental (valorização de resíduos e mitigação da poluição por corantes) com implicações econômicas (substituição de insumos convencionais por um resíduo abundante e de baixo custo, alinhando-se ao conceito de circularidade)
4	SUNDARARAMAN, S. et al., 2025.	Agrowaste, Nanotechnology, Biosorption, Contaminants, Circular economy, Sustainable	Results in Engineering	Strategic engineering and functional mechanism elucidation of advanced materials in detoxification of contaminated water matrices	Resíduos agroindustriais e materiais avançados derivados de biomassa	Corantes (Azul de Metileno, Violeta Cristal), metais pesados, pesticidas e fármacos	Superficial: A discussão se limita ao baixo custo e valorização de resíduos como justificativa estratégica. O artigo não apresenta cálculos, métricas financeiras ou análise de custos detalhada.	Ambiental. (O foco principal é a descontaminação, com a economia sendo um fator de viabilidade)

5	IJOMA, G. N. et al., 2025	Bioremediation, Biosorption, Effluents, Filtration-treatments, Sustainability, Wastewater	International Journal of Environmental Science and Technology	Assessing biosorbent materials for antibacterial properties and filtration efficiency for potential application in wastewater treatment	Dolomita, Cinzas Volantes (Fly Ash), Ossos de Vaca (Cow Bones), Cascas de Ovo (Eggshells), Carvão Ativado (usado como comparação e modificado) e Areia Fina (controle).	Bactérias (patógenos microbianos) em águas residuais	Parcialmente aprofundada: Apesar de incluir um indicador econômico baseado em CAPEX por volume tratado, o estudo não desenvolve uma análise financeira completa que considere OPEX, custos de regeneração, LCA monetarizada ou modelagem de viabilidade em escala. Assim, a presença do termo CAPEX não é suficiente para classificá-lo como aprofundado	Ambiental/Social (Saúde Pública)
6	NÚÑEZ-GÓMEZ, D. et al., 2025	Sodium removal; biowaste adsorbents; irrigation water; Mediterranean agriculture; circular economy	Clean Technologies	Use of Biowaste for Sodium Removal in Mediterranean Irrigation Water: A Sustainable Approach	Biorresíduos agrícolas: Casca de Amêndoa, Casca de Ovo e Púmice	Sódio (Na) em água de irrigação.	Superficial: A dimensão econômica se limita à justificação estratégica e conceitual da sustentabilidade e do uso de matéria-prima de baixo custo, não havendo demonstração de viabilidade de processo em escala.	Socioeconômica e Ambiental (Integrada)

7	CIANI, M. et al., 2025	Circular resource management; cyanobacteria; exopolysaccharides; metal biosorption; X-ray absorption spectroscopy	Polymers	Exploring Metal Interactions with Released Polysaccharides from <i>Cyanothece</i> sp. CE4: A Chemical and Spectroscopic Study on Biosorption Mechanism	Polissacarídeos Liberados	Metais Pesados: Cobre (Cu), Níquel (Ni) e Zinco (Zn).	Superficial: Embora contribua para o entendimento fundamental da biosorção, o artigo não aborda custos, escalabilidade, economia circular ou qualquer parâmetro relacionado à viabilidade econômica	Ambiental e Econômica (Integrada) / Científico-Ambiental. O estudo visa a remediação ambiental (remoção de metais pesados), mas usa a economia circular como pilar estratégico para a recuperação de recursos.
8	BAK, J. et al., 2024	Black soldier fly; chitin; waste biomass; cerium; biosorbent; rare earth elements; <i>Hermetia illucens</i> ; waste	Materials	Better Ce (III) Sorption Properties of Unprocessed Chitinous Waste from <i>Hermetia illucens</i> than Commercial Chitosans	Resíduos quitinosos não processados (unprocessed chitinous waste) de insetos	Cério (Ce(III)), um elemento de terras raras	Parcialmente aprofundada: O estudo discute a redução de etapas e insumos necessários, o que implica menor custo operacional. Contudo, essa discussão permanece qualitativa, sem apresentar cálculos financeiros, estimativas de CAPEX/OPEX ou modelos de análise econômica..	Ambiental e Econômica (Integrada)

9	RACCUIA, S. G. M. et al, 2024	Agri-food waste; circular economy; biomass valorisation; biosorbents; biobased material characterisation ; acid-base properties	Molecules	Multi-Analytical Approach for the Acid-Base, Thermal and Surface Properties Assessment of Waste Biomasses	Bagaços (Pomaces) de Bergamota, Uva e Azeitona	O estudo fornece a base para a remediação de poluentes catiônicos (como cátions metálicos) em águas naturais.	Superficial: Apesar de destacar a circularidade e o potencial de uso desses resíduos para a remediação de poluentes catiônicos, o trabalho não incorpora qualquer análise econômica detalhada.	Ambiental e Estratégica
10	ARAUJO, R. O. et al., 2024	Adsorption; biosorbents; emerging contaminants; pollutants; metals	Química Nova	BIOCHAR FROM LIGNOCELLULOSIC BIOMASS: A SUSTAINABLE CIRCULAR ECONOMY APPROACH FOR REMOVING ORGANIC AND INORGANIC CONTAMINANTS	Biochar derivado de biomassa lignocelulósica residual brasileira	Contaminantes orgânicos e inorgânicos, incluindo Metais (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ni, Zn, entre outros) , fármacos, produtos de cuidados pessoais, pesticidas e corantes.	Superficial: A viabilidade econômica é mencionada apenas de forma conceitual e estratégica. O foco é no potencial de aumentar a cadeia de valor de subprodutos agrícolas e na simplicidade da tecnologia de adsorção.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica). A solução técnica é a remediação de poluentes (Ambiental), mas a relevância do estudo é a estratégia de valorização de resíduos

11	BABALOLA, B. M.; WILSON, L. D., 2024	Eggshell biomass; composite materials; adsorbents; sustainable development; adsorption processes	Journal of Composites Science	Valorization of Eggshell as Renewable Materials for Sustainable Biocomposite Adsorbents—An Overview.	Casca de Ovo (Eggshell) e seus derivados (principalmente Carbonato de Cálcio e Nanocompósitos de Cálcio)	Metais pesados, corantes e outros contaminantes em águas residuais.	Superficial: A viabilidade econômica é mencionada apenas de forma conceitual e estratégica, baseada no fato de o material ser um resíduo e, portanto, ter baixo custo ou custo zero de matéria-prima.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica). A remediação ambiental é o objetivo técnico, mas a valorização do resíduo é o foco estratégico/conceitual.
12	FATIMA, R. et al., 2024	Pea pods, Biosorbents, Bioactive compounds, Dietary fibers, Food waste, Sustainability	Food Chemistry: X	Bridging sustainability and industry through resourceful utilization of pea pods- A focus on diverse industrial applications	Cascas de Ervilha (Pea pods)	Contaminantes em tratamento de águas residuais.	Superficial: A viabilidade econômica é mencionada apenas de forma conceitual/estratégica.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica)
13	CIANI, M. et al., 2024	Heavy metal, Semi-continuous cultivation, Marine cyanobacteria, Biosorption, Exopolysaccharides	New BIOTECHNOLOGY	Semi-continuous cultivation of EPS-producing marine cyanobacteria: A green biotechnology to remove dissolved metals obtaining metal-organic materials	Exopolissacarídeos (EPS) liberados e celulares de cianobactérias marinhas, cultivados em modo semi-contínuo.	Metais Pesados carregados positivamente: Cobre (Cu), Níquel (Ni) e Zinco (Zn)	Parcialmente aprofundado: Ele não só diz que os métodos tradicionais são caros, mas propõe uma alternativa biotecnológica com potencial de escala industrial e discute circularidade	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica)

14	MILJANIĆ, J. et al., 2024	Blackberry seed cold-pressed oil cake; nutritional quality; mineral composition; aflatoxin B1-adsorbing properties; biosorbents characterization	Foods	Assessment of the Nutritional Benefits and Aflatoxin B1 Adsorption Properties of Blackberry Seed Cold-Pressed Oil By-Product	Torta de Semente de Amora (BBSOC)	Aflatoxina B1 (AFB1), uma micotoxina carcinogênica que contamina alimentos e rações.	Superficial. A viabilidade é mencionada em termos conceituais: a valorização e reutilização de fluxos de resíduos pode oferecer um possível benefício ambiental e econômico.	Econômica/Social e Ambiental. O foco é a segurança alimentar/nutricional (Social) e a remediação de micotoxinas (Ambiental), alcançadas através da Valorização Estratégica do Resíduo (Econômico/Circular)
15	LUCACI, A.-R.; BULGARIU, L., 2024	Biosorption; algae wastes; decontamination processes; technologically valuable metal ions; wastewater	Water	Biosorption of Technologically Valuable Metal Ions on Algae Wastes: Laboratory Studies and Applicability.	Resíduos de Algas	Zinco, cobre e cobalto	Parcialmente aprofundada: O artigo foca na viabilidade da recuperação e reutilização dos metais valiosos. A demonstração da recuperação de ativos valiosos (e não apenas o descarte do poluente) e a reutilização do biossorvente, que são os pilares de custo/receita da Economia Circular.	Econômica e Ambiental (Integrada). O foco é duplo: Descontaminação (Ambiental) e Recuperação/Valorização de metais valiosos e do próprio resíduo (Econômica/Circular)

16	ALVARADO, M, C., 2023	Agricultural wastes, circular economy, Marang fruit wastes, utilization, value-adding	Food Bioengineering	Marang fruit (Artocarpus Odoratissimus) waste: A promising resource for food and diverse applications: A review of its current status, research opportunities, and future prospects	Resíduo do fruto Marango	Metais Pesados (ex: Chumbo e Cromo) e Corantes	Superficial: A viabilidade econômica é tratada de forma conceitual e estratégica.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica). A descontaminação (Ambiental) é uma das aplicações, mas a principal relevância é a Estratégia de Valorização do Resíduo (Econômica/Circular)
17	LAZAROVA, S. et al., 2023	Biosorbents; peanut shells; walnut shells; adsorption kinetics; methylene blue; dye removal	Processes	Valorization of Peanut and Walnut Shells through Utilisation as Biosorbents for the Removal of Textile Dyes from Water.	Cascas de Amendoim e Cascas de Noz	Corantes Têxteis em água	Superficial: A viabilidade econômica é mencionada apenas de forma conceitual e estratégica, focada na valorização do resíduo para reduzir o lixo agrícola.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica)
18	MIROS-KUDRA, P. et al., 2023	Lignin, sorption, biomass, zinc ions, water treatment	FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe	Removal of Zinc Ions from Aqueous Solutions with the Use of Lignin and Biomass Part II	Lignina e Biomassa	Íons de Zinco (Zn ²⁺) de soluções aquosas	Superficial: O artigo afirma que o objetivo é desenvolver métodos "práticos e econômicos" em resposta à tendência de gestão sustentável de subprodutos.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica)

19	OSMAN, A. I. et al., 2023	Adsorption , Biosorbents, Magnetic sorbents, Water treatment, Regeneration, Kinetics	Environmental Chemistry Letters	Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review.	Biossorventes e sorventes magnéticos feitos de biomassa moderna. (O artigo é uma revisão sobre a preparação de diversos tipos de biossorventes)	Contaminantes em água e águas residuais	Superficial: O artigo aborda a economia de forma conceitual e estratégica, justificando que a adsorção é "geralmente barata e eficaz" e que o uso de biossorventes evita que resíduos biológicos poluem.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica)
20	LEMOS, M. G. et al., 2023	Circular economy; wastewater; mining tailings; Au recovery; hydrochemistry	Water	Hydrochemistry, Elements Distribution and Their Potential Recoveries in Gold Metallurgical Treatment Tailings Dams.	Não é um estudo de biossorção, mas sim de recuperação/valorização de rejeitos	O estudo se foca na distribuição e no potencial de recuperação de elementos (incluindo Arsênio (As), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Níquel (Ni), Cromo (Cr)	Parcialmente aprofundada: Traz análise técnica e viabilidade aplicada, mas não chega ao nível de uma análise econômica completa com métricas financeiras.	Econômica. Embora o aspecto Ambiental (mitigação do risco de rejeitos) seja importante, a quantificação e o foco na "Recuperação de Elementos" para geração de receita elevam a Dimensão Econômica a predominante
21	KARIĆ, N. et al., 2022	Waste valorisation, Biosorption, Biosorbent, Adsorptive media (in)organic pollutants, Circular economy (In), Organic pollutants	Chemical Engineering Journal Advances	Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in)organic pollutants in wastewater treatment.	Resíduos Agrícolas	Poluentes inorgânicos de águas residuais	Superficial: A viabilidade econômica é tratada de forma estratégica e conceitual sob o termo "Valorização". Não há demonstração de dados financeiros, análise de custo/benefício.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica)

22	MAICANEANU, A.; INDOLEAN, C., 2022	Cadmium(II), biosorption, waste valorisation, circular economy, sunflower seed shell, carrot peel, bean pod, eggplant peel, orange peel.	Studia UBB Chemia	Investigation on the Potential Usage of Lignocellulosic Wastes for Cd(II) Removal.	Resíduos lignocelulósicos (casca de girassol, casca de cenoura, vagens de feijão, casca de berinjela, e casca de laranja).	Íons de Cádmio (Cd ²⁺) de águas residuais.	Parcialmente aprofundada: O artigo foca na viabilidade da "valorização de resíduos" e menciona o alinhamento com a "economia circular" nas palavras-chave e na introdução. A justificativa estratégica explícita de valor, posicionando o trabalho dentro de um novo modelo econômico.	Ambiental e Estratégica (Circular/Econômica)
23	LOFFREDO, E., 2022	Biochar; hydrochar; digestate; endocrine disruptor; estrogen; biosorbent; adsorption; water decontamination; soil remediation	Materials	Recent advances on innovative materials from biowaste recycling for the removal of environmental estrogens from water and soil.	Materiais Inovadores derivados de Reciclagem de Biorresíduos	Estrogênios Ambientais de água e solo.	Superficial: O artigo se concentra na sustentabilidade e na vantagem ambiental de reciclar biorresíduos para evitar a poluição e na produção de materiais "inovadores" para enfrentar emergências ambientais.	Ambiental e Estratégica (Circular/Ambiental)

24	MIROS-KUDRA, P.; SOBCZAK, P.; KOPANIA, E., 2022	Heavy metals, adsorption, biosorbents, lignin	Fibres & Textiles in Eastern Europe	Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions with the Use of Lignins and Biomass.	Ligninas e Biomassa	Metais Pesados	Superficial: A dimensão econômica é mencionada na introdução como a necessidade de desenvolver métodos "práticos e econômicos" para usar subprodutos. A análise se limita a essa justificativa de baixo custo da matéria-prima residual e da redução de ameaças ambientais.	Ambiental
25	HARRIPERSAD TH, C.; MUSONGE, P., 2022	Biosorption; breakthrough curves; mass transfer zone; mathematical modelling; green adsorbents; circular economy	Sustainability	The Dynamic Behaviour of a Binary Adsorbent in a Fixed Bed Column for the Removal of Pb ²⁺ Ions from Contaminated Water Bodies.	Adsorvente Binário	Íons de Chumbo Pb ²⁺ de corpos d'água contaminados.	Parcialmente aprofundada: O artigo tem como justificativa central a Sustentabilidade, que engloba a viabilidade econômica, além de focar no comportamento dinâmico em coluna de leito fixo. A análise em leito fixo é crucial para a escalabilidade e o design de um processo industrial de baixo custo, que é a base da viabilidade econômica em engenharia.	Ambiental e Estratégica (Sustentabilidade/Engenharia)

26	CARNIER, R. et al., 2022	Environmental contamination, heavy metals, remediation, biosorbents.	Bragantia	Cadmium and lead adsorption and desorption by coffee waste-derived biochars.	Bio-carvões derivados de Resíduos de Café, especificamente borra de café gasta e palha de café	Cádmio (Cd e Chumbo (Pb)	Superficial. A dimensão econômica é justificada implicitamente pelo uso de resíduos de baixo custo para criar um material promissor para remediação ambiental.	Ambiental e Técnica
27	CARNIER, R. et al., 2022	Coffee parchment; coffee grounds; biosorbents; soil solution speciation; remediation; mining soils	Process	Jack Bean Development in Multimetal Contaminated Soil Amended with Coffee Waste-Derived Biochars.	Biorcarvões derivados de resíduos de café	Solo contaminado com múltiplos metais	Parcialmente aprofundada: O estudo utiliza a valorização de resíduos (transformar lixo de café em insumo) como base econômica para a pesquisa, mas foca os resultados na performance técnica e ambiental do material.	Ambiental
28	MOUGA, T.; FERNANDES, I. B., 2022	Harvested biomass; waste biomass; Gelidium corneum applications; biorefinery; circular design; bio-based materials	Earth	The Red Seaweed Giant Gelidium (Gelidium corneum) for New Bio-Based Materials in a Circular Economy Framework.	Alga Marinha Vermelha	O artigo aborda a criação de materiais a partir da alga (como Ágar, Bio-Carvão, Bioetanol, etc.)	Parcialmente aprofundada: Embora seja uma revisão centrada na economia circular e na valorização de subprodutos de alto valor, não apresenta análises econômicas quantitativas (como CAPEX, OPEX ou LCA).	Estratégica (Economia Circular)

29	IVANOVSKA et al., 2021	Jute, Chemical modification, Alkali Oxidative, Sorption properties, Capillarity	Industrial Crops & Products	Obtaining jute fabrics with enhanced sorption properties and "closing the loop" of their lifecycle	Fibras de juta (Jute fabrics), modificadas quimicamente	O foco do artigo é na melhoria das propriedades de sorção (absorção e retenção de água) e no aumento do ciclo de vida da fibra para potenciais aplicações	Superficial: A dimensão econômica é mencionada como justificativa para o método de modificação.	Ambiental: O objetivo principal é a valorização de um resíduo/cultura (juta)
30	MADELA, M.; SKUZA, M., 2021	Circular economy; biowaste; biosorbents; sorption; metals	Energies	Towards a Circular Economy: Analysis of the Use of Biowaste as Biosorbent for the Removal of Heavy Metals	Analisa o uso de biorresíduos	Metais Pesados	Parcialmente aprofundada: A Economia Circular é o foco principal, mas a análise é uma revisão, não apresentando análises quantitativas aprofundadas, cálculos de viabilidade econômica diretos ou estudos de ciclo de vida (LCA).	Econômica/Ambiental.
31	DIAS, M. et al., 2021	Water remediation; food wastes; nutshells; heavy metals; contamination	International Journal of Environmental Research and Public Health	Nutshells as Efficient Biosorbents to Remove Cadmium, Lead, and Mercury from Contaminated Solutions	Cascas de Nozes	Cádmio (Cd), Chumbo (Pb) e Mercúrio (Hg)	Superficial: O artigo foca primariamente na eficiência técnica da remoção de metais usando cascas de nozes como biossorbentes. A menção à dimensão econômica se limita ao custo-benefício de usar um material de baixo custo ou resíduo, sem uma análise quantitativa aprofundada.	Ambiental/Técnica

32	LAGO, A.; SILVA, B.; TAVARES, T., 2021	Emerging pollutants; waste-based adsorbents/bios orbents; eco-friendly process; permeable barriers; reusability; circular economy	Recycling	Cleaner Approach for Atrazine Removal Using Recycling Biowaste/Waste in Permeable Barriers	Resíduos/Biorres íduos Reciclados	Atrazina	Superficial: O estudo enfatiza a "abordagem mais limpa" e a valorização de resíduos. A dimensão econômica está implícita no uso de resíduos como matéria-prima de baixo custo.	Ambiental
33	SHAH, A. J.; SONI, B.; KARMEE, S. K., 2021	Biosorbents, Circular economy, Waste management, Modelling, Scale up, Column study	Bioresources and bioprocessing	Locally available agroresidues as potential sorbents: modelling, column studies and scale-up	Agroresíduos (Serragem), talo de algodão e casca de amendoim	Azul de Metileno	Parcialmente aprofundada: A discussão sobre escalabilidade técnica vai além do nível superficial, mas não atinge o grau de aprofundamento esperado para a categoria "aprofundado".	Técnica / Ambiental. O foco é a avaliação da eficiência e otimização do processo de sorção
34	MAKSOU, M.I.A. et al, 2020	Water treatment, Magnetic adsorbents, Zero-valent iron, Iron oxides, Spinel ferrites, Biosorbents	Coordination Chemistry Reviews	Insight on water remediation application using magnetic nanomaterials and biosorbents	Biomassa algal, bacteriana, fúngica, e materiais agroindustriais.	Metais Pesados e Corantes	Superficial: O artigo menciona o "custo" do tratamento de águas residuais e se refere aos biossorbentes como "materiais de baixo custo"	Ambiental

35	ZHANG, H., CARILLO-NAVA RRETE, F., & PALET-BALLÚS, C., 2020	Hair; biofibre; metals; biosorption; kinetics; isotherms	Journal of Natural Fibers	Human Hair Biogenic Fiber as a Biosorbent of Multiple Heavy Metals from Aqueous Solutions	Fibra Biogênica de Cabelo Humano	Múltiplos Metais Pesados (Cádmio - Cd(II), Cobre - Cu(II) e Níquel - Ni(II))	Superficial: O estudo usa um resíduo de queratina (cabelo humano) que, de outra forma, seria descartado , sendo, portanto, um material de baixo custo e abundante. O artigo também faz referência à "valorização" de fibras de queratina para remoção de metais pesados, o que implica um benefício econômico na transformação de um resíduo em um produto de valor.	Ambiental/Técnica (remoção de contaminantes e estudo das propriedades do biossorvente).
----	-------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------	------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------