

## EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE DE MATERIAIS ADSORVENTES APLICADOS À REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS EM ÁGUA DE ABASTECIMENTO: UMA REVISÃO SISTEMATIZADA

Cézar Victor Alves de Lima\*

Vanessa Nunes Alves\*

**Resumo:** A presença de ferro e manganês em águas destinadas ao abastecimento humano constitui um desafio recorrente para os sistemas de tratamento, em razão de impactos estéticos, operacionais e econômicos associados a esses metais. Embora processos convencionais sejam amplamente empregados, limitações operacionais e a busca por soluções mais flexíveis têm impulsionado o interesse pela adsorção como alternativa ou tecnologia complementar. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistematizada da literatura sobre a eficiência e a sustentabilidade de materiais adsorventes aplicados à remoção de ferro e manganês em água de abastecimento humano. A revisão foi conduzida com base no protocolo PRISMA 2020, contemplando estudos publicados entre 2020 e 2026. Após as etapas de triagens foram selecionados 49 artigos, dos quais foram extraídos dados relativos ao tipo de adsorvente, metal-alvo, eficiência de remoção, pH e observações técnicas relevantes. A análise priorizou a identificação de padrões de desempenho em função das condições operacionais, especialmente do pH, bem como a reinterpretção dos resultados sob a perspectiva da sustentabilidade e da economia circular. Os resultados evidenciaram que a eficiência adsorvente varia significativamente conforme a categoria do material adsorvente e a faixa de pH, com desempenhos mais consistentes observados em condições específicas. Além disso, a análise integrada demonstrou que elevadas eficiências de remoção não implicam, necessariamente, maior sustentabilidade, ressaltando a importância de considerar aspectos operacionais, ambientais e de aplicabilidade prática. Dessa forma, esta revisão contribui ao sistematizar criticamente a literatura recente, oferecendo subsídios para a seleção mais criteriosa de materiais adsorventes em sistemas de abastecimento de água.

**Palavras-chave:** Qualidade da água; Tratamento de água; Economia circular.

### INTRODUÇÃO

O abastecimento de água potável constitui um elemento central da saúde pública e da segurança hídrica, sendo diretamente condicionado à qualidade dos recursos hídricos disponíveis e à eficiência dos processos de tratamento empregados (Soares *et al.*, 2021). Em diversos contextos hidrogeológicos, a presença de ferro e manganês na água bruta representa um desafio recorrente para os sistemas de abastecimento, demandando estratégias de controle compatíveis com os padrões de

---

\* Instituto de Química – UFCAT: [cezarvictoralves@gmail.com](mailto:cezarvictoralves@gmail.com); [vanessa.nunes@ufcat.edu.br](mailto:vanessa.nunes@ufcat.edu.br).

potabilidade e com a operação contínua das estações de tratamento (Soares *et al.*, 2021).

Os processos convencionais de remoção de ferro e manganês, baseados predominantemente em etapas de oxidação seguidas de filtração, apresentam ampla aplicação prática (Corrêa *et al.*, 2021). Entretanto, limitações associadas à variabilidade das condições da água bruta, à dependência de reagentes químicos e a restrições operacionais têm estimulado a investigação de tecnologias alternativas ou complementares (Costa Filho; Pontes Neto; Martelli, 2022). Nesse contexto, a adsorção tem sido amplamente explorada na literatura científica, em razão de sua flexibilidade operacional e da afinidade de diferentes materiais por espécies metálicas.

Paralelamente ao avanço dos estudos sobre eficiência adsorptiva, observa-se um interesse crescente na incorporação dos princípios de sustentabilidade e economia circular ao tratamento de águas (Asha; Pawels, 2022). No entanto, parte da produção científica tende a associar a adsorção e o uso de materiais alternativos a uma sustentabilidade intrínseca, frequentemente sem uma avaliação crítica que considere aspectos operacionais, ambientais e de aplicabilidade em sistemas de abastecimento de água (Asha; Pawels, 2022).

Nesse contexto, ainda são limitadas as revisões sistematizadas que organizem criticamente esses resultados, identifiquem padrões de eficiência em função das condições operacionais – especialmente do pH – e reavaliem esses desempenhos sob critérios técnicos e ambientais integrados. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão sistematizada da literatura sobre a aplicação de materiais adsorventes na remoção de ferro e manganês em água de abastecimento humano, analisando a eficiência de remoção reportada, as condições operacionais associadas e as implicações desses resultados à luz da sustentabilidade e da economia circular.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Ferro e manganês em sistemas de abastecimento de água: ocorrência, impactos e formas de tratamento

O ferro e o manganês são elementos amplamente distribuídos na crosta terrestre e figuram entre os metais mais frequentemente encontrados em águas destinadas ao abastecimento público, tanto em mananciais superficiais quanto subterrâneos (Pereira,

2021). A ocorrência desses elementos no meio aquático resulta da combinação entre processos naturais, associados ao intemperismo físico e químico de rochas e solos, e atividades antrópicas, como mineração, práticas agrícolas intensivas e lançamento de efluentes industriais (Pereira, 2021). Em ambientes aquáticos, o comportamento do ferro e do manganês é fortemente condicionado por variáveis físico-químicas, destacando-se o pH, o potencial de oxirredução, a temperatura e a presença de matéria orgânica dissolvida, fatores que determinam sua forma química predominante, mobilidade e estabilidade na água (Libânio, 2010).

O ferro ocorre na água sob diferentes espécies químicas, sendo mais comum na forma solúvel, como ferro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), e na forma oxidada, como ferro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), de menor solubilidade (Baumgarten; Paiva; Rodrigues, 2014). Em condições redutoras, especialmente na ausência de oxigênio dissolvido e em condições de pH reduzido, o ferro tende a permanecer dissolvido, frequentemente associado a bicarbonatos ou complexado com matéria orgânica, sem manifestação visual evidente. Em contraste, sob condições oxidantes, ocorre a conversão do  $\text{Fe}^{2+}$  em  $\text{Fe}^{3+}$ , favorecendo a formação de hidróxidos e óxidos insolúveis responsáveis pela coloração característica da água (Baumgarten; Paiva; Rodrigues, 2014).

O manganês, por sua vez, apresenta comportamento químico análogo ao do ferro no que se refere à dependência das condições redox do meio aquático, ocorrendo predominantemente na forma solúvel, como manganês divalente ( $\text{Mn}^{2+}$ ), permanecendo dissolvido e sem alterações visuais imediatas (Richter; Azevedo Netto, 1991). Sob condições oxidantes, entretanto, o manganês tende a se converter em espécies de menor solubilidade, como óxidos e hidróxidos, que podem precipitar e se acumular em unidades de tratamento e sistemas de distribuição (Emboaba, 2019). Diferentemente do ferro, a oxidação do manganês ocorre de forma mais lenta e, em geral, em faixas de pH mais elevadas, o que torna seu controle operacionalmente mais complexo nos sistemas de abastecimento de água (Libânio, 2010).

A presença de ferro e manganês em águas destinadas ao abastecimento humano causa impactos significativos em vários aspectos, como estéticos, operacionais e, em determinadas condições, potenciais implicações à saúde humana (Sousa, 2023). Do ponto de vista estético, concentrações elevadas desses metais promovem alterações visuais indesejáveis, com colorações que variam do amarelado ao avermelhado ou acastanhado no caso do ferro, e do cinza ao preto no caso do manganês (Mirlohi, 2022). Essas alterações comprometem a aceitabilidade da água

distribuída, uma vez que a coloração anormal é frequentemente interpretada pelos consumidores como indicativo de contaminação ou insegurança. Adicionalmente, a presença desses metais pode provocar manchas em roupas e superfícies sanitárias, bem como conferir sabor metálico à água, fatores que contribuem para a rejeição do produto (Mirlohi, 2022).

Sob a ótica operacional, o ferro e o manganês representam desafios relevantes para os sistemas de abastecimento. A oxidação desses metais e a consequente formação de precipitados insolúveis favorecem o acúmulo de depósitos em tubulações, reservatórios e equipamentos, resultando em redução da seção hidráulica, diminuição da vazão e aumento da frequência de manutenções corretivas (Libânio, 2010). Em redes de distribuição, esses depósitos podem ser remobilizados por variações hidráulicas, ocasionando episódios recorrentes de descoloração da água e comprometendo a confiabilidade do serviço. Em situações mais críticas, o acúmulo prolongado de incrustações ricas em ferro e manganês pode comprometer a integridade da infraestrutura, elevando os custos operacionais e exigindo intervenções estruturais de maior complexidade e custo (Li *et al.*, 2018).

No que se refere aos aspectos sanitários, a presença de ferro e manganês na água potável está, em geral, mais associada a questões de aceitabilidade do que a efeitos tóxicos diretos, especialmente no caso do ferro (Soares *et al.*, 2021). O manganês, entretanto, demanda maior atenção, uma vez que evidências científicas indicam que a exposição crônica por meio da água de consumo, particularmente em concentrações elevadas, pode estar associada a efeitos neurotóxicos, sobretudo em populações mais vulneráveis, como crianças (Corrêa *et al.*, 2021). Estudos epidemiológicos têm demonstrado associações entre a ingestão de manganês na água potável e prejuízos no desempenho cognitivo e na função verbal, reforçando a necessidade de controle rigoroso desse elemento em sistemas de abastecimento (Bouchard *et al.*, 2011; WHO, 2021).

Diante disso, o controle desses elementos constitui uma etapa relevante no projeto e na operação de sistemas de tratamento de água. A escolha da tecnologia de remoção depende de um conjunto de fatores, incluindo a concentração e a forma química predominante dos metais, as características físico-químicas da água bruta, as condições operacionais do sistema e os objetivos de desempenho e custo. Desse modo, diferentes rotas de tratamento têm sido historicamente empregadas e continuamente aprimoradas na literatura técnica.

Os métodos convencionais de remoção de ferro e manganês baseiam-se, em geral, na oxidação química dos íons solúveis seguida de processos de separação sólido-líquido, especialmente a filtração. A oxidação é promovida por agentes como cloro, permanganato de potássio e ozônio, que convertem o ferro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e o manganês divalente ( $\text{Mn}^{2+}$ ) em espécies oxidadas de menor solubilidade, favorecendo a formação de precipitados passíveis de remoção física (Soares *et al.*, 2021). A etapa subsequente de filtração é usualmente realizada em leitos granulares de areia, antracito ou meios catalíticos, responsáveis pela retenção das partículas formadas (Guimarães Corrêa *et al.*, 2021). Essa abordagem é amplamente adotada em estações de tratamento de água devido à sua eficácia comprovada, simplicidade operacional e custo relativamente reduzido, embora sua eficiência possa ser limitada em situações específicas, como baixas concentrações de oxigênio dissolvido, pH inadequado ou elevadas cargas de matéria orgânica (Khatri *et al.*, 2017).

Por outro lado, em cenários nos quais os processos convencionais de tratamento apresentam restrições operacionais ou desempenho insatisfatório, diferentes tecnologias alternativas e complementares vêm sendo investigadas na literatura. Nesse contexto, a adsorção tem se consolidado como uma rota de interesse para a remoção de ferro e manganês, sobretudo em razão de sua aplicabilidade em distintas faixas de concentração e da afinidade de diversos materiais adsorventes por espécies metálicas. A utilização desse método, que constitui o objeto central da presente revisão, tem sido amplamente explorada em estudos recentes, envolvendo diferentes matrizes aquosas e materiais adsorventes, conforme evidenciado nos trabalhos de (Costa Filho; Pontes Neto; Martelli, (2022); Dantas *et al.*, (2011); De Almeida *et al.*, (2019); Doumer *et al.*, (2025); Paz, (2016); Silveira, (2017); Soares *et al.*, (2021); Volpato *et al.*, (2020).

### **Sustentabilidade e economia circular no contexto do tratamento de águas**

A incorporação dos princípios de sustentabilidade no setor de saneamento e, de forma mais específica, no tratamento de águas destinadas ao abastecimento humano, tem se consolidado como uma demanda crescente frente aos desafios associados à escassez hídrica, ao aumento da complexidade dos contaminantes e à pressão por maior eficiência no uso de recursos naturais (Caciato, 2024). No entanto, a aplicação do conceito de sustentabilidade nesse contexto exige cautela analítica, uma vez que se trata de um constructo multidimensional, que envolve simultaneamente aspectos ambientais, econômicos e sociais, não podendo ser reduzido a ganhos pontuais de

eficiência ou à adoção isolada de determinada tecnologia (Caciato, 2024; Kloepffer, 2008).

No campo do tratamento de águas, essa complexidade se manifesta de forma particular, pois soluções tecnicamente eficazes nem sempre apresentam desempenho ambiental ou econômico satisfatório quando analisadas sob uma perspectiva sistêmica (Caciato, 2024). A literatura especializada destaca que a avaliação da sustentabilidade de processos de tratamento deve considerar todo o ciclo de vida das tecnologias empregadas, incluindo a extração e processamento de matérias-primas, o consumo de insumos químicos e energéticos, a geração de resíduos e emissões, bem como as possibilidades de reuso, regeneração ou disposição final dos materiais utilizados (Kloepffer, 2008).

Nesse contexto, a economia circular emerge como um referencial teórico complementar, propondo a transição de modelos lineares de produção e consumo para sistemas que busquem manter materiais, energia e valor econômico em uso pelo maior tempo possível.

Aplicada ao tratamento de águas, a economia circular tem sido discutida principalmente sob a ótica da valorização de resíduos e subprodutos, da redução do consumo de insumos primários e da minimização da geração de rejeitos. No entanto, a adoção desse referencial requer uma análise crítica das rotas tecnológicas propostas, especialmente no que se refere à origem dos materiais utilizados, às etapas de processamento necessárias para sua aplicação e ao destino após o esgotamento de sua vida útil. A Ellen MacArthur Foundation (2015) ressalta que a circularidade efetiva pressupõe não apenas o reaproveitamento de materiais, mas também a redução de perdas ao longo do sistema e a preservação do valor funcional dos produtos, o que implica considerar aspectos como durabilidade, regenerabilidade e reinserção em ciclos produtivos.

No caso específico de tecnologias aplicadas ao tratamento de água, diversos autores alertam que o uso de materiais alternativos ou derivados de resíduos não pode ser automaticamente interpretado como uma solução sustentável ou circular. Processos que demandam etapas intensivas de ativação química, consumo elevado de energia ou uso de reagentes agressivos podem comprometer os potenciais benefícios ambientais associados à valorização de resíduos, transferindo impactos para outras fases do ciclo de vida (Asha; Pawels, 2022). Assim, a avaliação da sustentabilidade dessas tecnologias deve considerar não apenas o desempenho na

remoção de contaminantes, mas também os *trade-offs* associados à sua produção, operação e disposição final.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo consiste em uma revisão sistematizada da literatura, conduzida com o objetivo de analisar a eficiência e a sustentabilidade de materiais adsorventes aplicados à remoção de ferro e manganês em sistemas aquosos. Para assegurar a padronização do processo de identificação, seleção e síntese dos estudos, a revisão foi desenvolvida de acordo com as diretrizes do método PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados ScienceDirect, Scopus e SciELO, contemplando estudos publicados no período de 2020 a 2026. Foram considerados exclusivamente artigos de pesquisa disponibilizados em acesso aberto. As estratégias de busca foram estruturadas a partir das seguintes combinações de palavras-chave: “iron removal” OR “manganese removal” AND adsorption e “remoção de ferro” OR “remoção de manganês” AND adsorção.

Uma vez identificados, os estudos foram submetidos à triagem inicial por meio da leitura de títulos e resumos, seguida da avaliação dos textos completos. Foram considerados elegíveis estudos experimentais que abordassem a remoção de ferro e/ou manganês em meio aquoso, utilizando a adsorção como mecanismo principal, com apresentação de dados quantitativos de desempenho, como eficiência de remoção (%) e parâmetros operacionais associados. Foram excluídos artigos de revisão, estudos baseados predominantemente em processos distintos da adsorção, como oxidação química, precipitação ou mecanismos biológicos, bem como aqueles que não apresentassem métricas quantitativas suficientes para permitir uma análise comparativa consistente.

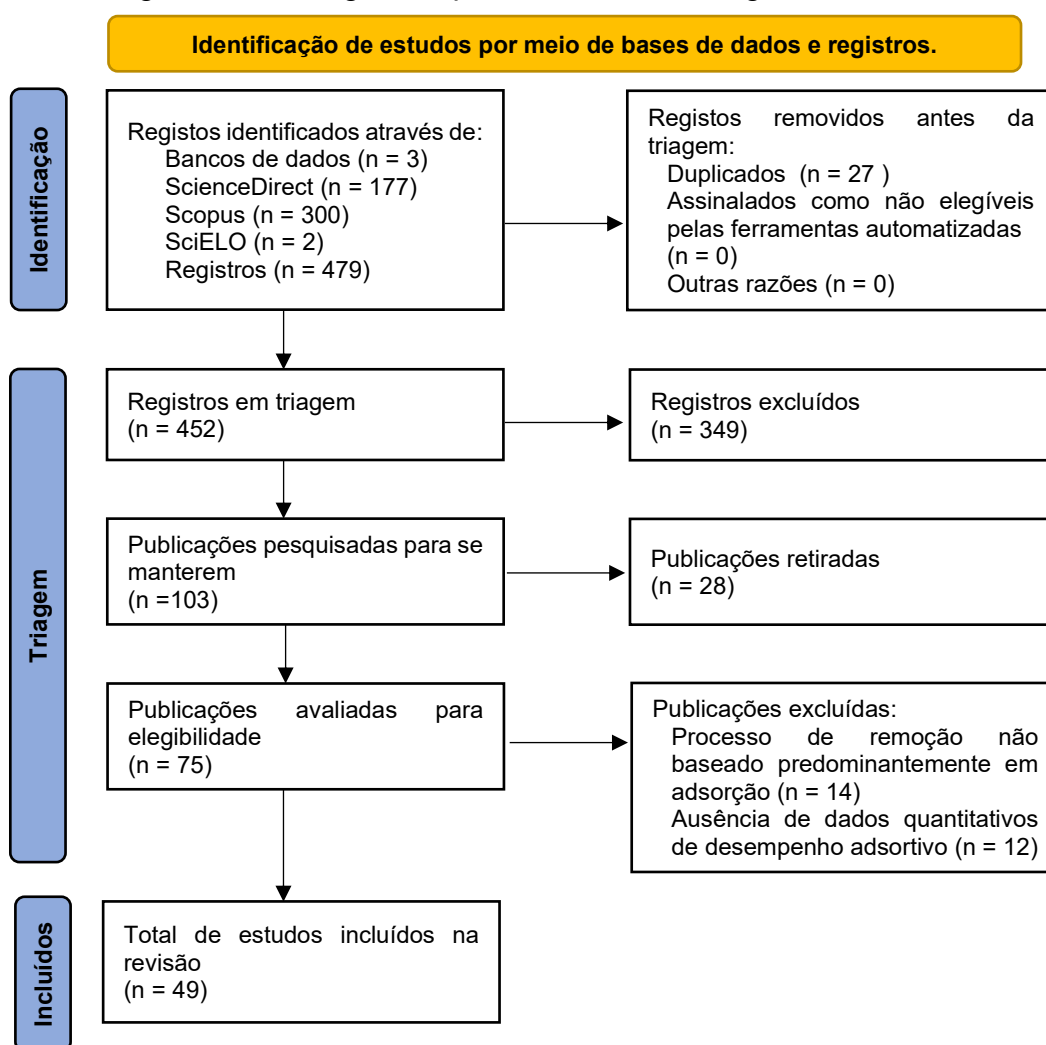
## RESULTADOS

Inicialmente, foram identificados 479 registros nas bases de dados pesquisadas. Após a remoção de registros duplicados e a triagem inicial com base na leitura dos títulos e resumos, 103 publicações foram mantidas para avaliação mais aprofundada. Na etapa seguinte, procedeu-se à análise do texto completo, ocasião em que 54 publicações foram excluídas em razão da utilização de processos de remoção não

baseados predominantemente em adsorção ou da ausência de dados quantitativos de desempenho adsorptivo.

Dessa forma, 49 estudos atenderam integralmente aos critérios de inclusão e compuseram a amostra final desta revisão sistematizada. O fluxograma PRISMA correspondente às etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma que resume a estratégia de busca de estudos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os 49 estudos incluídos neste estudo abordam a remoção de ferro e manganês em água por meio de processos predominantemente adsorptivos, evidenciando um campo de pesquisa consolidado, porém metodologicamente heterogêneo. Ao se observar o escopo analítico específico relacionado a esses dois metais, verifica-se que, entre os estudos que abordaram diretamente ferro e/ou manganês, 18 concentraram-se exclusivamente na remoção de ferro, 18 abordaram o manganês de forma isolada e 12 avaliaram simultaneamente ambos os metais. Essa distribuição revela que,

embora exista equilíbrio numérico entre as investigações voltadas ao ferro e ao manganês individualmente, a literatura ainda privilegia abordagens que tratam esses elementos de forma separada, em detrimento de análises integradas mais representativas de condições reais de abastecimento. Tal característica é particularmente relevante, considerando que ferro e manganês frequentemente coexistem nos mananciais utilizados para consumo humano, podendo interagir entre si e competir por sítios ativos nos materiais adsorventes.

Sob a perspectiva metodológica, os estudos analisados apresentam ampla heterogeneidade quanto às condições experimentais adotadas, ainda que compartilhem o uso de métricas quantitativas para avaliação do desempenho adsorativo. Todos os trabalhos incluídos reportaram parâmetros operacionais e indicadores de desempenho (como pH e eficiência), o que assegura disponibilidade de dados para análise comparativa. No entanto, a forma como essas variáveis são determinadas, controladas e discutidas varia substancialmente entre os estudos, refletindo diferenças no desenho experimental, no tipo de matriz aquosa empregada e nos critérios adotados para definição de desempenho. Em alguns trabalhos, o pH é tratado como variável central do processo e explorado sistematicamente, enquanto em outros aparece apenas como condição operacional fixa, sem discussão aprofundada de seu papel nos mecanismos de remoção. Essa assimetria metodológica impõe limites à comparação direta entre resultados individuais e reforça a necessidade de análises baseadas em tendências gerais e padrões recorrentes, em vez de comparações pontuais entre valores absolutos.

Outro aspecto central identificado na caracterização do conjunto analisado é a expressiva diversidade de materiais adsorventes investigados. Os estudos abrangem desde materiais tradicionalmente utilizados em processos de tratamento de água, como carvões ativados e meios granulares minerais, até uma ampla variedade de adsorventes alternativos, incluindo materiais de origem natural, biochars e compósitos quimicamente modificados.

### **Eficiência de remoção em função do pH e do tipo de material adsorvente**

A eficiência de remoção de ferro e manganês por processos adsorativos, quando analisada de forma isolada, tende a apresentar valores elevados na maior parte dos estudos incluídos nesta revisão. Contudo, a análise sistematizada dos dados evidencia que esses percentuais estão fortemente condicionados às faixas de pH adotadas e à

natureza do material adsorvente, o que inviabiliza interpretações baseadas apenas em valores máximos reportados. A Tabela 1 sintetiza essa relação ao apresentar a distribuição das eficiências medianas de remoção em função das faixas de pH e das categorias de adsorventes, permitindo visualizar, de forma integrada, faixas de pH nas quais determinadas categorias de adsorventes apresentam desempenho mais consistente, bem como intervalos em que a variabilidade da eficiência se torna mais pronunciada.

Tabela 1 – Eficiência mediana de remoção em função das faixas de pH e das categorias de adsorventes

<b>Categoria do adsorvente</b>	<b>pH &lt; 5,5</b>	<b>5,5 ≤ pH &lt; 6,5</b>	<b>6,5 ≤ pH ≤ 7,5</b>
Agro-resíduo/biomassa <i>in natura</i>	-	99,3%	100,0%
Biochar/hidrochar	-	96%	99,0%
Carvão ativado	99,1%	100,0%	100,0%
Compósito/modificado	98,0%	97,9%	-
Mineral natural (zeólitas/areias/argilas)	93,2%	83,5%	98,5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

No caso do ferro, observa-se, conforme detalhado na Tabela 1, que eficiências elevadas são frequentemente reportadas em pH < 5,5, com valores superiores a 98% em diferentes categorias de materiais, como carvão ativado e compósitos/modificados (Al-Gaashani *et al.*, 2025; Brishti *et al.*, 2023; Omran *et al.*, 2024). Esses resultados indicam que, em meio ácido, a adsorção pode ocorrer de forma eficiente mesmo na ausência de precipitação significativa de hidróxidos. Entretanto, a dispersão apresentada na Tabela 3, que relaciona diretamente pH e eficiência para diferentes categorias de adsorventes, evidencia que esse comportamento não é uniforme: quando ferro e manganês são avaliados conjuntamente, como na pesquisa de Naghipour *et al.*, (2020), por exemplo, a eficiência em pH ácido pode ser substancialmente inferior (87,5%), sugerindo efeitos de competição ou influência da matriz aquosa que não são captados em estudos focados em um único metal.

Tabela 2 – Faixas de eficiência por pH e categoria de adsorvente

<b>Categoria</b>	<b>Faixa de pH</b>	<b>n</b>	<b>Mín (%)</b>	<b>Referências</b>
Agro-resíduo/biomassa <i>in natura</i>	5,5 - 6,5	1	99,34	Raheem; Kadhim; Abdulhasan (2022)
	6,5 - 7,5	2	93,10	Cardoso <i>et al.</i> , (2025); Rudi <i>et al.</i> (2023)
Biochar/hidrochar	5,5 - 6,5	1	96,00	Gupta <i>et al.</i> (2024)
	6,5 - 7,5	1	98,97	Shaibur <i>et al.</i> (2025)
Carvão ativado	pH < 5,5	1	99,10	Brishti <i>et al.</i> (2023)
	5,5 - 6,5	1	100,00	Siabi <i>et al.</i> (2021)
	6,5 - 7,5	1	100,00	Chang <i>et al.</i> (2025)
Compósito/modificado	pH < 5,5	1	98,00	Omran <i>et al.</i> (2024)

	5,5 - 6,5	3	97,80	Abhilash Kumar <i>et al.</i> , (2024); El Shahawy <i>et al.</i> , (2022); You <i>et al.</i> (2021)
Mineral natural (zeólitas/areias/argilas)	pH < 5,5	2	87,50	(Al-Gaashani <i>et al.</i> , 2025; Naghipour <i>et al.</i> , 2020)
	5,5 - 6,5	2	69,00	(Hassouna; Mahmoud, 2020; Salimi <i>et al.</i> , 2022)
	6,5 - 7,5	2	97,00	(Li <i>et al.</i> , 2021; Yang <i>et al.</i> , 2021)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Valores individuais de pH e eficiência de remoção de ferro e manganês reportados nos estudos incluídos na análise comparativa

ID	Metal	Categoria	pH	Eficiência (%)
Brishti <i>et al.</i> (2023)	Fe	Carvão ativado	3,5	99,10
Al-Gaashani <i>et al.</i> (2025)	Fe	Mineral natural	4,0	99,00
Omran <i>et al.</i> (2024)	Fe	Compósito/modificado	4,0	98,00
Naghipour <i>et al.</i> (2020)	Fe + Mn	Mineral natural	5,0	87,50
You <i>et al.</i> (2021)	Fe + Mn	Compósito/modificado	5,79	100,00
El Shahawy <i>et al.</i> (2022)	Mn	Compósito/modificado	6,0	97,80
Abhilash Kumar <i>et al.</i> (2024)	Mn	Compósito/modificado	6,0	98,00
Hassouna; Mahmoud (2020)	Fe	Mineral natural	6,0	69,00
Raheem; Kadhim; Abdulhasan (2022)	Fe	Agro-resíduo/biomassa	6,5	99,34
Salimi <i>et al.</i> (2022)	Fe	Mineral natural	6,5	97,97
Siabi <i>et al.</i> (2021)	Fe + Mn	Carvão ativado	6,75	100,00
Rudi <i>et al.</i> (2023)	Mn	Agro-resíduo/biomassa	7,0	100,00
Chang <i>et al.</i> (2025)	Mn	Carvão ativado	7,0	100,00
Yang <i>et al.</i> (2021)	Fe + Mn	Mineral natural	7,3	97,00
Li <i>et al.</i> (2021)	Fe + Mn	Mineral natural	7,0	99,90
Gupta <i>et al.</i> (2024)	Fe	Biochar/hidrochar	7,0	96,00
Shaibur <i>et al.</i> (2025)	Fe + Mn	Biochar/hidrochar	7,0	98,97
Cardoso <i>et al.</i> (2025)	Mn	Agro-resíduo/biomassa	7,0	93,10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na faixa intermediária de pH ( $5,5 \leq \text{pH} < 6,5$ ), a variabilidade torna-se mais pronunciada, conforme evidenciado tanto na Tabela 1 quanto na Tabela 2. Embora alguns estudos mantenham eficiências elevadas, acima de 95% (Abdulhasan, 2022; Gupta *et al.*, 2024; Raheem *et al.*, 2022), outros apresentam quedas expressivas, como no trabalho de Hassouna; Mahmoud, (2020), cuja eficiência para ferro foi de 69,0%. Essa amplitude de respostas, claramente visualizada na distribuição heterogênea dos valores individuais na Tabela 3, indica que essa faixa de pH representa uma zona de transição, na qual pequenas diferenças nas propriedades dos adsorventes ou nas condições experimentais resultam em desempenhos contrastantes. A leitura conjunta do texto com os elementos visuais reforça que essa faixa não pode ser considerada universalmente favorável à adsorção, apesar de frequentemente ser tratada dessa forma na literatura.

Para manganês, os padrões identificados diferem parcialmente, conforme mostrado na Tabela 1, onde as maiores eficiências concentram-se predominantemente em pH próximo da neutralidade ( $6,5 \leq \text{pH} \leq 7,5$ ), com valores entre 93,1% e 100%, sustentados pelos estudos de (Cardoso *et al.*, 2025; Chang *et al.*, 2025; Rudi *et al.*, 2023), conforme discriminado na Tabela 2. A Tabela 3, por sua vez, confirma essa tendência ao evidenciar uma concentração de pontos de alta eficiência nessa faixa de pH, independentemente da categoria do adsorvente. Em pH levemente ácido ( $5,5 \leq \text{pH} < 6,5$ ), embora ainda sejam observadas eficiências elevadas para manganês (Abhilash Kumar *et al.*, 2024; El Shahawy *et al.*, 2022), a quantidade de estudos é limitada, o que limita inferências mais robustas sobre a estabilidade do desempenho nesse intervalo.

Nos estudos que avaliaram simultaneamente ferro e manganês, a análise integrada dos dados evidencia que o desempenho tende a ser mais consistente em pH próximo do neutro. Conforme apresentado na Tabela 2, os estudos de Li *et al.*, (2021), Shaibur *et al.*, (2025) e Yang *et al.*, (2021) reportaram eficiências entre 97,0% e 99,9% nessa faixa, comportamento que se reflete na Tabela 1 pela concentração de células de alta eficiência. Em contrapartida, a Tabela 3 mostra que, em pH mais ácido, os pontos correspondentes a sistemas Fe+Mn apresentam maior dispersão, indicando que a remoção simultânea impõe desafios adicionais, possivelmente associados à competição por sítios ativos e à complexidade da matriz aquosa.

A influência do tipo de material adsorvente torna-se particularmente clara quando os dados são analisados de forma cruzada. Materiais minerais naturais, como zeólitas, areias e argilas, apresentam comportamento altamente dependente do pH, com grande variabilidade de eficiência em  $5,5 \leq \text{pH} < 6,5$ , conforme evidenciado na Tabela 2 e visualmente destacado na Tabela 1 (Hassouna; Mahmoud, 2020; Salimi *et al.*, 2022). Em contraste, em pH próximo da neutralidade, esses materiais exibem desempenho mais consistente (Li *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021). Adsorventes à base de carvão ativado, embora representados por um número reduzido de estudos, mostram eficiências elevadas em diferentes faixas de pH (Brishti *et al.*, 2023; Chang *et al.*, 2025; Siabi *et al.*, 2021), o que se reflete na presença de valores máximos ao longo da Tabela 3, sugerindo maior robustez operacional, ainda que essa inferência deva ser interpretada com cautela devido ao tamanho amostral limitado.

Por sua vez, os biochars e hidrochars concentram seus dados em pH neutro, com eficiências entre 96,0% e 98,97% (Gupta *et al.*, 2024; Shaibur *et al.*, 2025), conforme apresentado na Tabela 2, enquanto materiais compósitos ou quimicamente

modificados mostram desempenho elevado e relativamente estável na faixa levemente ácida ( $5,5 \leq \text{pH} < 6,5$ ), sustentado pelas pesquisas de (Abhilash Kumar *et al.*, 2024; El Shahawy *et al.*, 2022; You *et al.*, 2021). A concentração desses resultados em uma faixa específica, claramente visível na Tabela 1, indica que modificações superficiais podem ampliar a eficiência em condições onde materiais não modificados apresentam maior dispersão.

A síntese comparativa apresentada na Tabela 4 permite observar que as categorias de adsorventes diferem não apenas quanto à eficiência reportada, mas sobretudo quanto à consistência do desempenho, à sensibilidade ao pH e à evidência disponível para remoção simultânea de ferro e manganês, aspectos que não se tornam evidentes quando os resultados são analisados apenas por valores máximos.

Tabela 4 — Perfil comparativo das categorias de materiais adsorventes para remoção de ferro e manganês em água de abastecimento

<b>Categoria de adsorvente</b>	<b>Faixa de pH com melhor desempenho</b>	<b>Consistência da eficiência</b>	<b>Sensibilidade ao pH</b>	<b>Observações comparativas</b>
Mineral natural (zeólitas, areias, argilas)	6,5 - 7,5	Baixa a moderada	Alta	Apresenta grande variabilidade de desempenho, especialmente em pH intermediário; eficiência fortemente dependente das características mineralógicas e do pH
Compósitos/ modificados	5,5 - 6,5	Alta	Moderada	Desempenho elevado e pouco disperso em faixa levemente ácida; evidência concentrada em domínio operacional específico
Carvão ativado	<5,5 a 7,5	Alta	Baixa	Eficiências elevadas em diferentes faixas de pH; número reduzido de estudos, mas com comportamento consistente
Biochar / hidrochar	6,5 - 7,5	Moderada	Moderada	Desempenho elevado próximo à neutralidade; dados ainda concentrados em faixa estreita de pH
Agro-resíduo / biomassa <i>in natura</i>	6,5 - 7,5	Moderada	Moderada a alta	Eficiência elevada em pH neutro, porém com maior amplitude de resultados, possivelmente associada à heterogeneidade do material

Fonte: Elaborada pelo autor.

Desse modo, a leitura integrada das Tabelas 1, 2, 3 e 4 demonstra, portanto, que a eficiência de remoção de ferro e manganês por adsorção é uma resposta condicionada pela interação entre pH, tipo de material adsorvente e metal-alvo, e não uma propriedade intrínseca dos materiais. Essa abordagem permite identificar domínios de desempenho mais estável, zonas de elevada variabilidade e lacunas de

informação, fornecendo uma base técnica mais consistente para a avaliação crítica dos materiais e para a discussão comparativa que será aprofundada no tópico seguinte.

### **Adsorção analisada à luz da sustentabilidade e da economia circular**

A análise da eficiência de remoção apresentada nos itens anteriores evidencia que o desempenho adsorptivo de diferentes materiais depende fortemente das condições operacionais, especialmente do pH e da natureza química do adsorvente. Entretanto, a interpretação desses resultados exclusivamente sob a ótica da eficiência pode conduzir a inferências incompletas quando o objetivo é discutir a aplicabilidade desses materiais em sistemas de abastecimento de água. Nesse contexto, torna-se necessário incorporar critérios relacionados à sustentabilidade e à economia circular como dimensões analíticas complementares, capazes de qualificar a leitura dos resultados sem reduzi-los a atributos automáticos dos materiais avaliados.

A sustentabilidade, no âmbito do tratamento de águas, não se restringe ao uso de matérias-primas alternativas ou à substituição de processos convencionais, mas envolve a avaliação integrada de aspectos como disponibilidade do material, complexidade de síntese ou ativação, estabilidade operacional, necessidade de regeneração e potencial geração de resíduos secundários (Asha; Pawels, 2022). Assim, materiais que apresentam elevadas eficiências de remoção, conforme discutido na seção anterior, não podem ser automaticamente classificados como sustentáveis, uma vez que tais desempenhos podem estar associados a processos de produção energeticamente intensivos ou a condições operacionais restritivas.

No caso do carvão ativado, os resultados compilados nesta revisão indicam eficiências consistentemente elevadas em diferentes faixas de pH. No entanto, a análise sob a ótica da sustentabilidade revela que esse desempenho está frequentemente associado a custos energéticos elevados durante a produção e a desafios relacionados à regeneração e ao descarte do material saturado. Dessa forma, embora tecnicamente robusto, o uso do carvão ativado exige uma avaliação criteriosa de seu ciclo de vida para que sua aplicação possa ser considerada alinhada à princípios de sustentabilidade.

Os adsorventes classificados como compósitos ou modificados apresentaram, de modo geral, elevadas eficiências em faixas de pH levemente ácidas, conforme evidenciado na Tabela 2. Contudo, sob a perspectiva da sustentabilidade, esses materiais demandam uma análise mais cautelosa, uma vez que sua preparação

frequentemente envolve o uso de reagentes químicos, etapas adicionais de síntese e, em alguns casos, a incorporação de metais ou óxidos específicos. Esses fatores podem aumentar a complexidade operacional e os impactos ambientais associados à produção do adsorvente, limitando sua aplicação em larga escala, especialmente em contextos de tratamento de água para abastecimento público.

Os adsorventes derivados de agro-resíduos e biomassa *in natura* apresentam uma interface mais direta com os princípios da economia circular, uma vez que se baseiam no reaproveitamento de materiais residuais e na valorização de fluxos que, de outra forma, seriam descartados. Os dados analisados indicam eficiências elevadas sobretudo em pH próximo à neutralidade, condição favorável do ponto de vista operacional. Todavia, a variabilidade observada nos resultados, associada à heterogeneidade intrínseca desses materiais, impõe desafios relacionados à padronização, reprodutibilidade e controle de desempenho, aspectos críticos para sua adoção em sistemas de abastecimento.

De maneira semelhante, os biochars e hidrochars apresentam potencial relevante quando analisados sob a ótica da economia circular, especialmente por possibilitarem a conversão de resíduos orgânicos em materiais funcionalizados para remoção de contaminantes. Os resultados desta revisão indicam bom desempenho em faixas de pH próximas à neutralidade, porém a sustentabilidade desses materiais está fortemente condicionada aos parâmetros de produção, como temperatura, tempo de residência e consumo energético, o que reforça a necessidade de avaliações integradas que extrapolem a eficiência adsortiva isolada.

Por sua vez, os minerais naturais, apesar de apresentarem maior variabilidade de eficiência, destacam-se pela ampla disponibilidade, baixo custo e simplicidade de aplicação. Esses atributos conferem vantagens do ponto de vista operacional e logístico, embora o desempenho químico inferior observado em algumas faixas de pH limite sua aplicação isolada. Ainda assim, quando analisados sob critérios de sustentabilidade, esses materiais podem representar soluções viáveis em contextos específicos, especialmente quando associados a estratégias complementares de tratamento.

A síntese crítica desses aspectos é apresentada na Tabela 5, que relaciona o desempenho adsortivo discutido nos itens anteriores com implicações associadas à sustentabilidade e à economia circular. Essa abordagem permite compreender que a relevância dos materiais adsorventes não reside apenas em sua eficiência máxima,

mas na convergência entre desempenho, estabilidade operacional e viabilidade ambiental, elementos essenciais para a aplicação prática em sistemas de abastecimento de água.

Tabela 5 – Síntese crítica do desempenho adsorativo e implicações de sustentabilidade das categorias de materiais adsorventes avaliadas

<b>Categoria de adsorvente</b>	<b>Desempenho adsorativo observado</b>	<b>Estabilidade operacional</b>	<b>Potencial de economia circular</b>	<b>Principais limitações</b>
Carvão ativado	Elevado e consistente em ampla faixa de pH	Alta	Condicional à origem da matéria-prima	Alto custo energético e desafios de regeneração
Compósitos/modificados	Elevado em faixas específicas de pH	Moderada a alta	Limitado	Complexidade de síntese e uso de reagentes químicos
Agro-resíduo/biomassa in natura	Elevado próximo à neutralidade	Moderada	Alto	Variabilidade e baixa padronização
Biochar/hidrochar	Elevado em pH próximo à neutralidade	Moderada	Alto, condicionado ao processo	Dependência das condições de produção
Minerais naturais	Variável	Alta	Moderado	Eficiência química inferior em algumas condições

Fonte: Elaborada pelo autor.

## CONCLUSÕES

Esta revisão sistematizada analisou criticamente a eficiência e a sustentabilidade de materiais adsorventes aplicados à remoção de ferro e manganês em água de abastecimento humano, a partir da síntese de 49 estudos publicados entre 2020 e 2026, selecionados segundo os critérios do protocolo PRISMA 2020. A abordagem adotada permitiu não apenas compilar resultados de eficiência, mas reinterpretá-los à luz de condições operacionais relevantes, especialmente o pH, e de critérios associados à sustentabilidade e à economia circular, ampliando a compreensão sobre a aplicabilidade desses materiais em contextos reais de tratamento de água.

Os resultados evidenciaram que a eficiência de remoção de ferro e manganês por adsorção apresenta forte dependência do pH e da categoria do material adsorvente, com padrões distintos de desempenho e consistência entre os grupos analisados. Adsorventes como carvão ativado e materiais compósitos ou modificados apresentaram eficiências elevadas e relativamente estáveis em faixas específicas de pH, enquanto materiais naturais, agro-resíduos e biochars demonstraram desempenho

satisfatório principalmente em condições próximas à neutralidade, ainda que com maior variabilidade.

Contudo, a principal contribuição desta revisão reside na demonstração de que a eficiência adsorptiva, embora essencial, não constitui um critério isolado suficiente para orientar a seleção de materiais em sistemas de abastecimento de água. A incorporação de critérios de sustentabilidade e economia circular evidenciou que materiais frequentemente associados a elevado desempenho podem apresentar limitações relevantes quando considerados aspectos como complexidade de síntese, consumo energético, regeneração e gestão de resíduos. Por outro lado, materiais derivados de biomassa, agro-resíduos e minerais naturais revelaram potencial significativo quando avaliados sob uma perspectiva integrada, desde que suas limitações operacionais e de padronização sejam adequadamente consideradas.

Adicionalmente, esta revisão identificou lacunas importantes na literatura, especialmente no que se refere à padronização das condições experimentais, à avaliação conjunta de ferro e manganês em um mesmo sistema e à escassez de estudos que integrem análises de desempenho adsorptivo com avaliações ambientais ou de ciclo de vida. A predominância de estudos focados em faixas restritas de pH e em condições laboratoriais reforça a necessidade de investigações que avancem em direção a cenários mais próximos da realidade operacional de estações de tratamento de água.

Por fim, os achados apresentados contribuem para o avanço do conhecimento ao oferecer uma leitura crítica e integrada da literatura recente, destacando não apenas quais materiais apresentam elevado potencial de remoção de ferro e manganês, mas em quais condições esse potencial se mostra tecnicamente consistente e ambientalmente justificável.

## REFERÊNCIAS

- ABHILASH KUMAR, K.A. *et al.* Manganese metal ion removal from aqueous solution using industrial wastes derived geopolymer. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 22, p. 100999, 2024.
- AL-GAASHANI, R. *et al.* Comparative study on antibacterial activities and removal of iron ions from water using novel modified sand with silver through the hydrothermal technique. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, 2025.

- ASHA, P.T.; PAWELS, R. Sustainable water treatment technologies: a review. **Sustainability, Agri, Food and Environmental Research**, v. 10, n. X, p. 1-11, 2022.
- BAUMGARTEN, M.G.Z.; PAIVA, M.L.; RODRIGUES, H.R.S. Kit analítico simplificado: uma ferramenta para avaliação massiva da qualidade da água subterrânea. **Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 2, p. 95-105, 2014.
- BOUCHARD, M.F. *et al.* Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. **Environmental Health Perspectives**, v. 119, n. 1, p. 138 - 143, 2011.
- BRISHTI, R.S. *et al.* Adsorption of iron(III) from aqueous solution onto activated carbon of a natural source: Bombax ceiba fruit shell. **Results in Chemistry**, v. 5, 2023.
- CACIATO, E.H.A. **Metodologia para avaliação do estágio de incorporação das práticas ESG - social, ambiental e governança - pelas empresas de saneamento**. 2024. 101 f. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2024.
- CARDOSO, A.P. *et al.* Comparative evaluation of lead and manganese removal from contaminated water using cocos nucifera shell powder in batch and continuous adsorption systems. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 53, p. 483-494, 2025.
- CHANG, Y.J. *et al.* Efficient removal of manganese ions from waters using hypochlorite-modified granular activated carbon. **Journal of Environmental Management**, v. 373, 2025.
- CORRÊA, G.J. *et al.* REMOÇÃO DE MANGANÊS EM ÁGUA BRUTA DA ETA V DE ARARANGUÁ. **Revista Vincici**, v. 6, n. 2, p. 217-235, 2021.
- COSTA FILHO, M.C.; PONTES NETO, A.M.A; MARTELLI, M.C. O uso de compostos zeolíticos como adsorventes para a remoção de metais pesados (Pb, Cu, Cr e Mn): uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, 2022.
- DANTAS, A.D.B. *et al.* Remoção de cor, de ferro e de manganês em água com matéria orgânica dissolvida por meio da pré-oxidação, coagulação, filtração e adsorção em carvão ativado granular. **Revista DAE**, v. 59, n. 186, p. 46-55, 2011.
- DE ALMEIDA, A.B.B. *et al.* Concentration of iron and manganese in water supply in the municipality of Crato, Ceará: Characterization and proposal of treatment. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 2, 2019.
- DOUMER, M. E. *et al.* Remoção de ferro e manganês de águas de abastecimento público com uso de zeólitas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 32, 2025, Brasília: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2025.
- EL SHAHAWY, A. *et al.* Adsorption of Mn(ii) ions from wastewater using an AgNPs/GO/chitosan nanocomposite material. **Rsc Advances**, v. 12, n. 45, p. 29385-29398, 2022.

- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a Circular Economy**: Business rationale for an accelerated transition. Inglaterra, 2015.
- Emboaba, D.G. **Estudo comparativo de remoção de ferro e manganês de solução aquosa por ozonização seguida de filtração utilizando areia, zeólita e carvão ativado granular**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2019.
- GUPTA, P.C. *et al.* Screening of Sustainable Biochar Adsorbent for Iron Removal from Water. **Ssr International Journal of Civil Engineering**, v. 11, n. 5, 2024.
- HASSOUNA, M.E.M.; MAHMOUD, M.H. Realistic decontamination of Fe<sup>2+</sup> ions from groundwater using bentonite/ chitosan composite fixed bed column studies. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 19, n. 4, 2020.
- KHATRI, N.; TYAGI, S.; RAWTANI, D. Recent strategies for the removal of iron from water: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 19, p. 291-304, 2017.
- KLOEPFFER, W. Life cycle sustainability assessment of products. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, p. 89-95, 2008.
- LI, G. *et al.* Characterization and release profile of (Mn, Al)-bearing deposits in drinking water distribution systems. **Chemosphere**, v. 197, p. 73-80, 2018.
- LI, X. *et al.* Preparation, characterization serpentine-loaded hydroxyapatite and its simultaneous removal performance for fluoride, iron and manganese. **RSC Advances**, v. 11, n. 27, p. 16201-16215, 2021.
- LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. Ed. Campinas: Editora Átomo., 2010.
- MIRLOHI, S. Characterization of Metallic Off-Flavors in Drinking Water: Health, Consumption, and Sensory Perception. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 24, 16829, 2022.
- NAGHIPOUR, D. *et al.* Adsorption of Fe(II) and Mn(II) using glauconitic greensands from aqueous solution. **Desalination and Water Treatment**, v. 190, 2020.
- OMRAN, K.A. *et al.* Chitosan/Alginate nanocomposites containing magnetic nanoparticles and multi-wall carbon nanotubes for efficient iron sorption. **Desalination and Water Treatment**, v. 317, p. 100294, 2024.
- PAZ, E.C. **Análise da eficiência de remoção de ferro e manganês de águas de abastecimento por filtração adsortiva**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2016.
- PEREIRA, J.G. **Levantamento dos níveis de metais pesados em águas brasileiras: uma visão toxicológica**. 2021. 65 f. Monografia (Graduação em Farmácia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

- RAHEEM, S.A.; KADHIM, E.J.; ABDULHASAN, M.J. Comparative Study of Iron Removal from Groundwater Using Low-Cost Adsorbents. **Journal of Ecological Engineering**, v. 23, n. 11, p. 18-23, 2022.
- RUDI, N.N *et al.* Chemical Treatment of Banana Blossom Peels Adsorbent as New Approach for Manganese Removal: Isotherm and Kinetic Studies. **Sustainability Switzerland**, v. 15, n. 13, 2023.
- SALIMI, A.H. *et al.* Total iron removal from aqueous solution by using modified clinoptilolite. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 13, n. 1, 2022.
- SHAIBUR, M.R. *et al.* Removal of iron, manganese, and arsenic from groundwater by using banana and pineapple peel charcoal: evidence from sophisticated techniques. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 11, 2025.
- SIABI, W.K. *et al.* Modelling the adsorption of iron and manganese by activated carbon from teak and shea charcoal for continuous low flow. **Water Energy Nexus**, v. 4, p. 88-94, 2021.
- SILVEIRA, H.A. **Remoção de ferro e manganês através de filtração adsorptiva em zeólitas, em escala de bancada e unidade de filtração piloto**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irapit, 2017.
- SOARES, I.S. *et al.* Estudo da remoção e controle de ferro nas águas da nascente Serra do Andrade-MG. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, 2021.
- SOUSA, J. S. F. O. **Impactos ambientais e na saúde pública das águas de abastecimento no Município de Aracati-CE**. 2023. 149 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- VOLPATO, S.B. *et al.* Tratamento de efluentes ácidos para a remoção do manganês e de metais pesados associados aos efluentes da mineração de carvão por meio dos processos de floculação e flotação por ar dissolvido. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 55, n. 4, p. 536-551, 2020.
- WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Manganese in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality**. Geneva: WHO, 2021.
- YANG, H. *et al.* Oxidants-assisted sand filter to enhance the simultaneous removals of manganese, iron and ammonia from groundwater: Formation of active MnOx and involved mechanisms. **Journal of Hazardous Materials**, v. 415, 2021.
- YOU, K. *et al.* Simultaneous removal of fluoride, manganese and iron by manganese oxide supported activated alumina: Characterization and optimization via response surface methodology. **Water Science and Technology**, v. 84, n. 12, p. 3799-3816, 2021.