

APLICAÇÕES DA NANOTECNOLOGIA NA REMEDIAÇÃO DE SOLOS E ÁGUAS CONTAMINADAS

Thiago de Araújo Cardoso¹, Ruy Bessa Lopes²

¹ Discente da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Instituto de Ciência e Tecnologia das Águas (ICTA), Santarém, PA, Brasil. E-mail: thiago.card@ymail.com

² Docente da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Laboratório de Contaminantes Emergentes e Ecotoxicologia, – Instituto de Ciência e Tecnologia das Águas (ICTA), Santarém, PA, Brasil.

Resumo: A contaminação de solos e águas por poluentes exige tecnologias mais eficientes de remediação. Este estudo analisa o uso de nanopartículas de ferro zero-valente (nZVI) na recuperação de áreas contaminadas, por meio de uma revisão bibliográfica qualitativa. Os estudos indicam elevada eficiência na degradação de compostos orgânicos e imobilização de metais pesados. Apesar do potencial, desafios ecotoxicológicos e regulatórios ainda limitam sua aplicação em larga escala.

Palavras-chave: nanotecnologia; remediação ambiental; nanopartículas de ferro zero-valente; contaminação de solos; tratamento de águas

INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades industriais, agrícolas e urbanas tem ampliado a contaminação de solos e recursos hídricos por metais pesados, hidrocarbonetos e compostos orgânicos persistentes. Esses poluentes apresentam alta estabilidade química e toxicidade, dificultando sua degradação natural e representando riscos à saúde humana e aos ecossistemas. Métodos tradicionais de remediação, como escavação e estabilização química, são caros e podem gerar impactos secundários. Nesse contexto, a nanotecnologia surge como

alternativa promissora, permitindo manipular materiais em escala nanométrica (1–100 nm), o que confere maior área superficial e elevada reatividade.

As nanopartículas de ferro zero-valente (nZVI) destacam-se entre os nanomateriais mais estudados para remediação ambiental. Elas possuem alta capacidade redutora, transformando contaminantes tóxicos em substâncias menos nocivas (Manfron et al., 2020). A aplicação *in situ* reduz custos e intervenções invasivas. Estudos experimentais confirmam a eficiência das nZVI na degradação de corantes e na redução

de metais pesados (Vieira et al., 2014; Siveris et al., 2018). Apesar dos avanços, o uso de nanopartículas em ambientes naturais exige atenção a possíveis impactos ecotoxicológicos e a necessidade de regulamentação. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar criticamente as aplicações de nanopartículas de ferro zero-valente na remediação de solos e águas contaminadas, discutindo mecanismos de ação, eficiência e desafios para sua aplicação segura.

MATERIAL E MÉTODOS

Trata-se de revisão bibliográfica qualitativa, de caráter descritivo e exploratório. O levantamento foi realizado nas bases Google Acadêmico, SciELO e Periódicos CAPES, utilizando os descritores “nanotecnologia”, “remediação ambiental”, “nZVI”, “contaminação de solos” e “tratamento de águas”.

Foram considerados estudos publicados nos últimos anos, incluindo artigos, teses e dissertações relacionados ao uso de nanomateriais em remediação ambiental. Após triagem e critérios de pertinência temática, os estudos foram organizados e analisados em categorias temáticas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 1. Síntese dos estudos sobre aplicações da nanotecnologia na remediação ambiental.

Autor (ano)	Tipo de estudo	Contaminante -alvo	Nanomaterial	Mecanismo de ação	Principais resultados	Limitações identificadas	Potencial de aplicação
Manfron et al. (2020)	Revisão teórica	Compostos orgânicos clorados e metais pesados	nZVI	Redução química e imobilização	Alta eficiência na degradação e estabilização de contaminantes	Influência do pH e composição do solo	Elevado potencial para remediação in situ
Santos (2019)	Revisão bibliográfica	Poluentes diversos	Nanomateriais diversos	Adsorção e fotocatalise	Aumento da eficiência na remoção de poluentes	Ausência de regulamentação e avaliação de riscos	Aplicação promissora em tratamento de águas
Fonseca et al. (2018)	Revisão experimental	Múltiplos contaminantes	nZVI	Reações redutivas	Elevada capacidade redutora	Desempenho variável conforme matriz do solo	Potencial elevado condicionado à adaptação local
Vieira et al. (2014)	Experimental laboratorial	Azul de metileno	nZVI	Degradação redutiva	Redução significativa do contaminante	Resultados obtidos em ambiente controlado	Necessidade de validação em campo
Siveris et al. (2018)	Experimental in situ	Cromo hexavalente (CrVI)	nZVI	Redução e imobilização	Conversão para formas menos tóxicas	Baixa mobilidade em solo argiloso	Aplicação viável com restrições operacionais
Bernardo (2024)	Experimental / escala piloto	Solventes clorados	nZVI	Degradação redutiva	Resultados satisfatórios em água subterrânea	Aplicação em escala real ainda limitada	Potencial para expansão tecnológica
Dos Santos et al. (2019)	Revisão teórica	Poluentes emergentes	Nanoadsorventes e nanomembranas	Adsorção e separação	Alta eficiência na remoção	Poucos estudos em larga escala	Forte potencial para sistemas avançados

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Aplicações das nZVI em solos contaminados

A análise dos estudos selecionados evidencia que a nanotecnologia tem se consolidado como abordagem estratégica para remediação ambiental, especialmente por meio do uso de nanopartículas de ferro zero-valente (nZVI). Conforme sintetizado na

Tabela 1, observa-se predominância de pesquisas voltadas ao uso dessas nanopartículas em processos de degradação redutiva e imobilização de contaminantes, com resultados consistentes tanto em estudos experimentais quanto em revisões teóricas.

Os trabalhos analisados convergem ao demonstrar elevado desempenho das nZVI

na remediação de compostos orgânicos clorados e metais pesados, sobretudo em função de sua elevada área superficial e capacidade redutora (Manfron et al., 2020; Fonseca et al., 2018). Estudos experimentais corroboram esse potencial, como os de Vieira et al. (2014) e Siveris et al. (2018), que evidenciaram significativa redução de contaminantes em condições laboratoriais e aplicações in situ.

Apesar desses resultados, a literatura indica que a eficiência reportada não é uniforme e depende de variáveis ambientais como pH, composição mineralógica do solo, presença de matéria orgânica e mobilidade das partículas. Além disso, fenômenos como agregação nanoparticulada e passivação superficial podem comprometer a reatividade das nZVI, reduzindo seu desempenho em condições reais.

Nesse contexto, Fonseca et al. (2018) destacam a necessidade de compreender o comportamento do nanoferro em solos brasileiros, considerando as particularidades dos ambientes tropicais e suas implicações sobre estabilidade e desempenho do material. Essa discussão é relevante porque desloca a análise do potencial tecnológico para a adaptação prática da tecnologia às condições locais.

A aplicação de nZVI em solos contaminados com corantes orgânicos demonstrou desempenho expressivo na degradação redutiva do azul de metileno (Vieira et al., 2014), enquanto estudos com cromo hexavalente apontam capacidade de conversão do contaminante em formas menos tóxicas e menos móveis (Siveris et al., 2018). Esses resultados reforçam a versatilidade do nanoferro para diferentes classes de contaminantes.

Bernardo (2024) amplia essa perspectiva ao demonstrar resultados satisfatórios no tratamento de águas subterrâneas impactadas por solventes clorados, indicando que fatores como dispersão, mobilidade e estabilidade da suspensão de nanoferro influenciam diretamente a eficácia do tratamento.

De forma geral, os estudos indicam elevado potencial das nZVI na remediação de solos contaminados; entretanto, desafios associados à escalabilidade, estabilidade do material e avaliação de impactos ambientais ainda limitam sua aplicação em larga escala, reforçando a necessidade de integração entre desempenho tecnológico e segurança ambiental.

Uso da nanotecnologia no tratamento de águas contaminadas

No tratamento de águas contaminadas, os estudos analisados evidenciam expansão do

uso de nanomateriais em processos de adsorção, separação e degradação catalítica de poluentes. Além das nanopartículas metálicas, destacam-se nanoadsorventes, nanomembranas e materiais fotocatalíticos, ampliando o espectro de aplicações da nanotecnologia no setor hídrico.

Foladori et al. (2016) situam a nanotecnologia como parte de uma agenda mais ampla de inovação voltada à segurança hídrica, destacando aplicações em remediação, potabilização e dessalinização. Essa abordagem amplia a discussão ao relacionar o desenvolvimento tecnológico não apenas à eficiência técnica, mas também às políticas públicas e à governança ambiental.

Dos Santos et al. (2019) demonstram que nanomembranas e nanoadsorventes apresentam elevada eficiência na remoção de poluentes emergentes e microrganismos patogênicos, contribuindo para métodos potencialmente mais rápidos e sustentáveis quando comparados a técnicas convencionais.

Entretanto, apesar do potencial observado, a aplicação desses materiais ainda enfrenta limitações relacionadas a custos operacionais, regeneração dos materiais, fouling em membranas e desafios de implementação em escala industrial. Esses

fatores indicam que a eficiência laboratorial dos nanomateriais nem sempre se traduz diretamente em viabilidade operacional.

Assim, embora a nanotecnologia represente avanço significativo no tratamento de águas contaminadas, sua consolidação depende não apenas do aprimoramento dos materiais, mas também da superação de barreiras técnicas, econômicas e regulatórias.

Limitações e desafios da nanorremediação

Embora os resultados da literatura evidenciem elevado potencial dos nanomateriais na remediação ambiental, persistem desafios científicos e tecnológicos que condicionam sua aplicação segura e efetiva.

Entre os principais desafios destaca-se a estabilidade das nanopartículas no ambiente, especialmente em razão de processos de aglomeração, passivação superficial e alterações de mobilidade, fatores que podem comprometer a reatividade e reduzir a eficiência observada em laboratório.

Além disso, a avaliação ecotoxicológica dessas partículas permanece como tema crítico. A possibilidade de efeitos secundários sobre organismos não alvo, bioacumulação e impactos ecossistêmicos reforça a necessidade de abordagens

baseadas em precaução e monitoramento ambiental.

Outro ponto emergente refere-se ao desenvolvimento de rotas mais sustentáveis de síntese, incluindo a produção biológica de nanopartículas por microrganismos e extratos vegetais, estratégia apontada como promissora para reduzir impactos associados à produção dos nanomateriais (Santos, 2019).

Do ponto de vista tecnológico, o avanço da nanorremediação depende do desenvolvimento de materiais mais estáveis, seletivos e eficientes, bem como de validações em escala piloto e condições reais de campo. A integração entre síntese controlada, desempenho operacional e avaliação de risco aparece como condição central para viabilizar aplicações futuras.

Assim, mais do que comprovar eficiência, os desafios atuais concentram-se em transformar o potencial da nanotecnologia em soluções ambientalmente seguras, regulatoriamente viáveis e operacionalmente aplicáveis.

CONCLUSÃO

A análise realizada evidencia que a nanotecnologia se consolida como alternativa inovadora e estratégica para a remediação de solos e águas contaminadas, com destaque para as nanopartículas de ferro

zero-valente (nZVI), cujo desempenho tem demonstrado elevado potencial em processos de degradação, redução e imobilização de contaminantes.

No conjunto dos estudos analisados, observa-se que a aplicação das nZVI apresenta resultados promissores tanto em processos de remediação de solos quanto no tratamento de águas contaminadas, especialmente pela elevada reatividade do material e pelo potencial de aplicação in situ. Esses aspectos reforçam a relevância da nanotecnologia como abordagem complementar ou, em determinados contextos, alternativa a métodos convencionais de remediação.

Entretanto, os resultados também evidenciam que a eficiência dessas aplicações depende de variáveis ambientais e operacionais, como características do solo, mobilidade das partículas e condições geoquímicas do meio. Além disso, desafios relacionados à avaliação ecotoxicológica, à regulamentação e ao monitoramento de impactos ambientais ainda representam fatores críticos para sua ampliação em escala real.

Dessa forma, conclui-se que o avanço da nanorremediação depende não apenas do desenvolvimento de materiais mais eficientes, mas também da integração entre pesquisas experimentais, avaliação de riscos

e políticas públicas que assegurem aplicações ambientalmente seguras e tecnologicamente viáveis. Nesse sentido, o fortalecimento de estudos em condições reais e em escala piloto constitui etapa estratégica para consolidar o uso dessas tecnologias na recuperação ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Oeste do Pará e ao Instituto de Ciência e Tecnologia das Águas pelo apoio acadêmico e institucional que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BERNARDO, Vinícius Falchi. Ensaio de bancada para avaliação de tratabilidade de água subterrânea impactada por solventes clorados com suspensão de nanoferro zero-valente (nZVI). 2024. Tese (Doutorado em Engenharia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

DOS SANTOS, Tássia Rhuna Tonial et al. Aplicação da nanotecnologia no tratamento de água: uma revisão. *Uningá Review*, Maringá, v. 34, n. 2, p. 51-72, 2019.

FOLADORI, Guillermo et al. Nanotecnologia e água no Brasil. *Acta*

Scientiarum. Human and Social Sciences, Maringá, v. 38, n. 2, p. 153-161, 2016.

FONSECA, Rita et al. Aplicação de nanotecnologia na remediação ambiental: uso de nanopartículas de ferro zero-valente (nZVI) em materiais contaminados. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 12, n. 3, p. 625-632, 2018.

MANFRON, Sidiane et al. Aplicação de nanopartículas de ferro zero-valente (nZVI) na remediação de solos e águas subterrâneas contaminadas: uma revisão. *Química Nova*, São Paulo, v. 43, n. 5, p. 623-631, 2020.

SANTOS, Vinicius Teodoro dos. O uso da nanotecnologia no combate à poluição de águas. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

SIVERIS, Wagner Luis et al. Injeção de nanoferro (nZVI) para remediação de solo argiloso contaminado com cromo hexavalente. *Revista de Gestão Ambiental*, v. 9, n. 2, p. 78-85, 2018.

VIEIRA, Gabriela Bonfanti et al. Uso de nanopartículas de ferro zero-valente na remediação de solos contaminados: degradação redutiva do azul de metileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: COBEQ, 2014.