

TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS APLICADAS À DETECÇÃO DE CONTAMINANTES AMBIENTAIS: UMA REVISÃO

Alex Gonçalves Feitosa*

Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo*

Cristiano Morita Barrado*

Resumo: O avanço da nanotecnologia tem impulsionado o desenvolvimento de nanomateriais com propriedades diferenciadas, ampliando significativamente suas aplicações no contexto da química ambiental. Entre esses materiais, as nanopartículas magnéticas destacam-se pelo comportamento superparamagnético, elevada área superficial e possibilidade de recuperação por campos magnéticos externos, características que as tornam promissoras para a detecção e monitoramento de contaminantes ambientais. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica abrangente sobre as principais técnicas analíticas empregadas na caracterização de nanopartículas magnéticas aplicadas às análises ambientais. Foram discutidas, de forma integrada, técnicas como Difração de Raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura, Espectroscopia de Energia Dispersiva, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier e Magnetometria de Amostra Vibrante, destacando suas contribuições para a avaliação da estrutura cristalina, morfologia, composição química, funcionalização superficial e propriedades magnéticas desses materiais. A análise da literatura evidencia que a caracterização rigorosa é essencial para assegurar o desempenho, a estabilidade e a segurança ambiental das nanopartículas magnéticas, além de permitir a correlação entre propriedades físico-químicas e eficiência em aplicações ambientais. Dessa forma, o estudo reforça a importância da integração entre nanotecnologia e química ambiental no desenvolvimento de soluções analíticas mais eficientes, sustentáveis e alinhadas à mitigação dos impactos ambientais.

Palavras-chave: Nanotecnologia; Nanopartículas magnéticas; Técnicas de caracterização; Química ambiental; Contaminantes ambientais.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da nanotecnologia tem promovido avanços significativos na concepção de novos materiais com propriedades físico-químicas diferenciadas, impulsionando aplicações em diversas áreas do conhecimento, incluindo a química ambiental. Os nanomateriais são definidos como materiais que apresentam pelo menos uma de suas dimensões na faixa de 1 a 100 nm, intervalo no qual emergem fenômenos como o aumento expressivo da área superficial específica e efeitos

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

quânticos que alteram propriedades ópticas, magnéticas e reativas em comparação aos materiais em escala macroscópica (OLIVEIRA, 2024; WANG *et al.*, 2023).

Entre os nanomateriais, as nanopartículas destacam-se pela versatilidade estrutural e pela possibilidade de controle preciso de parâmetros como tamanho, morfologia e composição química. Essas características tornam as nanopartículas especialmente atrativas para aplicações ambientais, nas quais a eficiência de processos como adsorção, detecção e remoção de contaminantes depende diretamente da interação entre a superfície do material e os poluentes presentes em matrizes complexas (SOUZA *et al.*, 2024; LIMA *et al.*, 2024).

Nesse contexto, as nanopartículas magnéticas (MNPs), em especial aquelas baseadas em óxidos de ferro como magnetita (Fe_3O_4) e maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), têm despertado crescente interesse científico. Essas partículas apresentam comportamento superparamagnético quando sintetizadas em escala nanométrica, permitindo sua manipulação por campos magnéticos externos sem magnetização residual significativa, o que facilita sua recuperação e reutilização após os processos de adsorção ou análise (SANTOS *et al.*, 2025; SILVA, 2025).

A aplicação das MNPs em análises ambientais envolve tanto o desenvolvimento de sensores e nanossensores quanto o uso desses materiais como adsorventes para contaminantes orgânicos e inorgânicos, incluindo metais pesados, pesticidas e poluentes emergentes. Segundo Torres (2023), a utilização de nanossensores magnéticos representa uma estratégia promissora para o monitoramento ambiental devido à elevada sensibilidade analítica e à redução do tempo de resposta. Contudo, a eficiência dessas aplicações está diretamente relacionada às propriedades estruturais, químicas e magnéticas das partículas, as quais dependem da rota de síntese e da funcionalização superficial empregada (ALBUQUERQUE *et al.*, 2022; MARTINS *et al.*, 2025).

Dessa forma, a caracterização detalhada das nanopartículas magnéticas constitui uma etapa indispensável para assegurar seu desempenho, estabilidade e segurança ambiental. Técnicas analíticas como Difração de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Magnetometria de Amostra Vibrante (VSM) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) fornecem informações fundamentais

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

sobre a estrutura cristalina, morfologia, composição química e propriedades magnéticas desses materiais (GONÇALVES *et al.*, 2023; PEREIRA, 2023).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo revisar e discutir as principais técnicas de caracterização de nanopartículas magnéticas aplicadas à detecção de contaminantes ambientais, evidenciando a contribuição dessas ferramentas analíticas para o desenvolvimento de materiais mais eficientes, seletivos e sustentáveis no contexto da química ambiental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Nanomateriais e o surgimento da nanotecnologia aplicada ao meio ambiente

A nanotecnologia consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das áreas mais promissoras da ciência dos materiais, promovendo avanços significativos na compreensão e no desenvolvimento de sistemas com propriedades ajustáveis em escala nanométrica. Nanomateriais são definidos como materiais que apresentam ao menos uma de suas dimensões entre 1 e 100 nm, faixa na qual propriedades físicas, químicas e biológicas passam a diferir substancialmente daquelas observadas em materiais convencionais (OLIVEIRA, 2024; WANG *et al.*, 2023). Essas alterações decorrem, principalmente, do aumento da razão área superficial/volume e da manifestação de efeitos quânticos, que impactam diretamente a reatividade, a condutividade e o comportamento magnético dos materiais.

No contexto ambiental, a nanotecnologia passou a ser explorada como resposta às limitações dos métodos tradicionais de monitoramento e remediação de poluentes. Processos convencionais frequentemente apresentam baixa seletividade, elevado consumo energético e geração de resíduos secundários. Nesse cenário, os nanomateriais oferecem alternativas mais eficientes, capazes de atuar em níveis traço de contaminantes e em matrizes ambientais complexas, como águas naturais, efluentes industriais e solos contaminados (VIEIRA, 2026; TORRES, 2023).

Diversos estudos apontam que o sucesso da aplicação ambiental dos nanomateriais depende diretamente do controle rigoroso de suas propriedades estruturais e superficiais. Souza *et al.* (2024) ressaltam que pequenas variações no tamanho das partículas podem alterar drasticamente a cinética de adsorção e a afinidade por determinados poluentes. Dessa forma, a caracterização detalhada

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

desses materiais torna-se indispensável para garantir desempenho, estabilidade e segurança ambiental.

2.2. Nanopartículas: propriedades, síntese e relevância ambiental

As nanopartículas constituem uma das classes mais investigadas dentro dos nanomateriais, em virtude de sua elevada versatilidade e ampla gama de aplicações. De acordo com Lima *et al.* (2024), a possibilidade de ajustar parâmetros como tamanho, forma, composição química e funcionalização superficial permite a obtenção de nanopartículas projetadas para funções específicas, incluindo adsorção seletiva, catálise ambiental e detecção analítica.

A síntese de nanopartículas pode ser realizada por diferentes rotas, como métodos químicos, físicos e biológicos, cada um apresentando vantagens e limitações. Martins *et al.* (2025) destacam que métodos químicos, como coprecipitação e sol-gel, são amplamente utilizados devido ao baixo custo e à facilidade de controle da composição. No entanto, esses métodos exigem monitoramento rigoroso das condições experimentais, uma vez que variações no pH, temperatura ou concentração dos precursores podem resultar em partículas heterogêneas, com impacto direto no desempenho ambiental.

No âmbito da química ambiental, as nanopartículas têm sido aplicadas tanto na remediação quanto no monitoramento de contaminantes. Gonçalves *et al.* (2023) demonstram que a elevada área superficial dessas partículas favorece a interação com poluentes orgânicos e inorgânicos, aumentando a eficiência dos processos de adsorção. Entretanto, os autores alertam que a falta de controle sobre a estabilidade coloidal pode levar à agregação das partículas, reduzindo sua eficiência e dificultando sua recuperação após o uso.

2.3. Nanopartículas magnéticas: fundamentos e comportamento superparamagnético

Entre as diferentes classes de nanopartículas, as nanopartículas magnéticas (MNPs) destacam-se por combinarem propriedades estruturais e magnéticas que ampliam significativamente seu potencial de aplicação ambiental. As MNPs mais estudadas são aquelas baseadas em óxidos de ferro, como magnetita (Fe_3O_4) e

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), devido à sua relativa biocompatibilidade, estabilidade química e forte resposta a campos magnéticos externos (ALBUQUERQUE *et al.*, 2022; SILVA, 2025).

Quando reduzidas à escala nanométrica, essas partículas passam a apresentar comportamento superparamagnético, caracterizado pela ausência de magnetização residual na ausência de campo magnético. Segundo Santos *et al.* (2025), essa propriedade é essencial para aplicações ambientais, pois permite a separação rápida do material após o processo de adsorção ou detecção, seguida de redispersão eficiente no meio, evitando problemas como entupimento de filtros ou formação de aglomerados permanentes.

A magnetização de saturação, a coercividade e a remanência são parâmetros críticos que determinam a eficiência das MNPs em aplicações práticas. Lima *et al.* (2024) afirmam que valores elevados de magnetização de saturação facilitam a recuperação do material mesmo em grandes volumes de água, reduzindo o tempo de processamento e o consumo energético. Assim, a avaliação dessas propriedades torna-se um requisito fundamental para validar o uso das MNPs em sistemas ambientais reais.

2.4. Aplicações das nanopartículas magnéticas em análises ambientais

As aplicações ambientais das nanopartículas magnéticas abrangem tanto a remediação quanto o monitoramento de contaminantes. No campo da remediação, as MNPs têm sido amplamente utilizadas como adsorventes para a remoção de metais pesados, compostos orgânicos persistentes e poluentes emergentes. Albuquerque *et al.* (2022) demonstraram elevada eficiência na remoção de íons metálicos utilizando MNPs funcionalizadas com agentes quelantes, destacando a importância da modificação superficial para aumentar a seletividade do material.

No monitoramento ambiental, as MNPs têm sido incorporadas ao desenvolvimento de sensores e nanossensores magnéticos. Torres (2023) aponta que esses dispositivos apresentam elevada sensibilidade analítica, baixo limite de detecção e possibilidade de análise *in situ*, características fundamentais para a proteção de ecossistemas vulneráveis. Wang *et al.* (2023) complementam que a integração das MNPs a plataformas analíticas modernas permite a detecção rápida de contaminantes em níveis traço, superando limitações dos métodos convencionais.

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

Apesar dessas vantagens, a literatura ressalta desafios associados ao uso das MNPs, como a possível lixiviação de íons metálicos, a toxicidade ambiental e a perda de eficiência após ciclos sucessivos de uso. Vieira (2026) enfatiza que esses riscos podem ser mitigados por meio de caracterização rigorosa e funcionalização adequada, reforçando a importância das técnicas analíticas no desenvolvimento desses materiais.

2.5. Importância das técnicas de caracterização de nanopartículas magnéticas

2.5.1. Difração de raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX), constitui uma das técnicas analíticas mais robustas e amplamente utilizadas na caracterização estrutural de materiais nanométricos, incluindo nanopartículas magnéticas baseadas em óxidos de ferro como magnetita (Fe_3O_4) e maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (SANTOS *et al.*, 2023; KIM *et al.*, 2025; WANG *et al.*, 2025).

Fundamentada no fenômeno da difração elástica de raios X por retículos cristalinos, conforme descrito pela lei de Bragg ($n\lambda = 2d \sin\theta$), a DRX permite a identificação precisa de fases cristalinas, a determinação do tamanho médio de cristalitos via equação de Scherrer ($D = K\lambda / \beta \cos\theta$, onde $K \approx 0,9$, λ é o comprimento de onda $\text{Cu K}\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$ e β a largura à meia altura) e a avaliação de parâmetros como tensão reticular, distorções e pureza de fase (ZHANG *et al.*, 2021; PATEL *et al.*, 2024). Essa técnica opera tipicamente em modo θ - 2θ com radiação monocromática, gerando padrões de difração característicos que são comparados a bancos de dados como ICDD/JCPDS para confirmação de estruturas espinélio inversas cúbicas (grupo espacial $\text{Fd}\bar{3}\text{m}$), comuns em nanopartículas magnéticas, com picos diagnósticos em $2\theta \approx 30,1^\circ, 35,5^\circ, 43,2^\circ, 53,5^\circ, 57,0^\circ$ e $62,6^\circ$ para magnetita pura [KIM *et al.*, 2025; SINGH *et al.*, 2025]. Sua não destrutividade, alta resolução angular (tipicamente $0,01^\circ$ - $0,02^\circ$) e capacidade de análise quantitativa via refinamento Rietveld tornam-na indispensável para diferenciar fases magnéticas responsivas de impurezas antiferromagnéticas como hematita ou goethita, que podem comprometer aplicações ambientais, com limites de detecção de fases secundárias ~ 1 - $5 \text{ wt\%}$ (WANG *et al.*, 2025; GUPTA *et al.*, 2023). Ademais, a DRX é sensível a efeitos de tamanho quântico, revelando alargamento de picos em NPs $< 50 \text{ nm}$ devido à limitação de Bragg, e

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

permite monitorar transformações de fase sob tratamentos térmicos ou dopagens (ex.: Co, Mn), sendo essencial para garantir estabilidade termodinâmica em condições ambientais ácidas ou alcalinas (ZHANG *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2025).

No contexto da remediação ambiental, a DRX tem sido aplicada de forma sistemática para validar a cristalinidade e estabilidade de nanopartículas magnéticas em cenários reais de contaminação. No estudo de Kim *et al.* (2025), a técnica foi empregada para diferenciar fases como magnetita e hematita em nanopartículas destinadas à degradação de contaminantes em solo e água, revelando picos característicos em $2\theta = 30,1^\circ$, $35,5^\circ$, $43,1^\circ$ e $57,0^\circ$, indicativos de estrutura cúbica espinélio inverso com tamanho médio de cristallitos de 20-30 nm (KIM *et al.*, 2025). Complementarmente, Santos *et al.* (2023) utilizaram DRX em Fe_3O_4 sintetizadas por coprecipitação para confirmar cristalinidade em tratamento de esgoto anaeróbico, enquanto Wang *et al.* (2025) aplicaram-na em híbridos para validar fases estáveis em fotocatalise aquosa, destacando a finalidade de garantir responsividade magnética em condições ambientais adversas e a especificidade para quantificar distorções reticulares (SANTOS *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2025).

2.5.2. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) representa uma ferramenta espectroscópica de alta versatilidade para a análise qualitativa e quantitativa de grupos funcionais superficiais em nanopartículas magnéticas, explorando absorções vibracionais na faixa de $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ com resolução espectral $<4\text{ cm}^{-1}$ (WANG *et al.*, 2025; ZHANG *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2025).

Baseada na transformada de Fourier de interferogramas gerados por um interferômetro Michelson, a FTIR identifica modos vibracionais característicos como Fe-O em óxidos de ferro ($\sim 550\text{-}600\text{ cm}^{-1}$ para espinélios), O-H esticamento ($\sim 3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$) em hidroxilas superficiais, e bandas de funcionalização como C=O ($\sim 1700\text{ cm}^{-1}$), N-H ($\sim 3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$) ou Si-O ($\sim 1000\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$) em recobrimentos sílica ou poliméricos (SANTOS *et al.*, 2023; CHEN *et al.*, 2025). Sua capacidade de operar em modos ATR (Atenuância Total Refletida) ou DRIFTS (Espectroscopia de Refletância Difusa) permite análises de amostras opacas ou hidratadas, comuns em contextos ambientais, com profundidade de penetração $\sim 0,5\text{-}5\text{ }\mu\text{m}$ e sensibilidade a interações

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

quimissorção vs. fisissorção (deslocamentos $\Delta\nu > 10 \text{ cm}^{-1}$ indicativos de coordenação química) (WANG *et al.*, 2025; PATEL *et al.*, 2024). A técnica quantifica cobertura superficial via razão de intensidades, sendo crucial para avaliar estabilidade coloidal em pH variáveis (3-11) e presença de íons competidores, com vantagem em monitorar degradação de recobrimentos durante ciclos de reutilização (LI *et al.*, 2025; SINGH *et al.*, 2025).

No trabalho de Wang *et al.* (2025), o FTIR foi utilizado em híbridos de óxidos de ferro para adsorção e fotocatalise de poluentes orgânicos em água, confirmando funcionalização com grupos amino que aumentam seletividade para corantes como Rodamina B (WANG *et al.*, 2025). Zhang *et al.* (2021) empregaram-na em MnFe_2O_4 para detectar estabilização com carboximetilcelulose (CMC) em imobilização de As(III) em solo, e Li *et al.* (2025) monitoraram Fe-O em nano-adsorventes para metais pesados, com finalidade de otimizar estabilidade coloidal e quimissorção (ZHANG *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2025).

2.5.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/SEM) acoplada à Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/SEM), frequentemente acoplada à Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), fornece imagens topográficas de alta resolução (~1-10 nm) e análises elementares locais em nanopartículas magnéticas, operando com feixes de elétrons de 5-30 kV para gerar sinais secundários (SE) para morfologia e retrodispersados (BSE) para contraste atômico (SANTOS *et al.*, 2023; JOHNSON *et al.*, 2025; SINGH *et al.*, 2025).

O EDS, baseado em espectrometria de fluorescência X induzida, detecta elementos $Z > 5$ com resolução energética ~130 eV, permitindo mapeamento quantitativo (precisão 1-5% via correção ZAF/PB-ZAF) de Fe, O, dopantes e contaminantes em áreas ~1 μm^2 , ideal para avaliar agregação, uniformidade de tamanho (distribuição log-normal típica em sínteses úmidas) e heterogeneidades superficiais em NPs expostas a matrizes ambientais complexas (ZHANG *et al.*, 2021; GUPTA *et al.*, 2023). Essa combinação destaca-se pela análise *in situ* de amostras não condutoras após metalização (Au/Pt ~5 nm), revelando agregados hierárquicos

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

que impactam acessibilidade em remediação (SANTOS *et al.*, 2023; PATEL *et al.*, 2024).

Em Santos *et al.* (2023), o SEM/EDS foi aplicado em Fe₃O₄ para tratamento de esgoto anaeróbico, revelando partículas esféricas quasi-monodispersas (~50 nm) com composição estequiométrica Fe:O ~ 1:1,2 e ausência de impurezas metálicas (SANTOS *et al.*, 2023). Johnson *et al.* (2025) usaram-no em NPs engenheiradas para resíduos, correlacionando morfologia com separação magnética, e Singh *et al.* (2025) em IONPs biogênicos para poluentes orgânicos, visando acessibilidade superficial (JOHNSON *et al.*, 2025; SINGH *et al.*, 2025).

A espectroscopia de energia dispersiva (EDS), integrada ao SEM/TEM, fornece perfis elementares com linhas características (ex.: Fe K α 6,4 keV, O K α 0,5 keV) e mapas 2D/3D, quantificando estequiometria e distribuição em NPs magnéticas com detecção de traços (<0,1 wt%), superando ICP em análises locais para pós-adsorção (ZHANG *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2023; LI *et al.*, 2025). Sua correção matricial (ZAF) assegura precisão em matrizes orgânicas/ambientais, essencial para certificar lixiviação zero (GUPTA *et al.*, 2023). Em Zhang *et al.* (2021), a EDS quantificou Mn:Fe:O ~1:2:4 em MnFe₂O₄ para As(III) em solo (>90% remoção) (ZHANG *et al.*, 2021). Santos *et al.* (2023) confirmaram estequiometria em esgoto, e Li *et al.* (2025) mapearam enriquecimento de metais (SANTOS *et al.*, 2023; LI *et al.*, 2025).

2.5.4. Magnetometria de Amostra Vibrante (VSM)

A Magnetometria de Amostra Vibrante (VSM) quantifica o ciclo de histerese magnético de nanopartículas com sensibilidade ~10⁻⁶ emu, medindo magnetização (M) vs. campo aplicado (H, até ± 20 kOe) para parâmetros como Ms (saturação), Mr (remanência), Hc (coercividade) e suscetibilidade, essencial para superparamagnetismo (Hc ≈ 0 , Ms > 40 emu/g em NPs <20 nm) (JOHNSON *et al.*, 2025; KIM *et al.*, 2025; CHEN *et al.*, 2025). Distingue relaxações Néel (intrínseca) e Brownian (hidrodinâmica), com Ms corrigida por *dead magnetic layer* (~0,5-2 nm espessura), e curvas ZFC/FC revelam *blocking temperature* (TB), operando a 300 K para simular condições ambientais (PATEL *et al.*, 2024; GUPTA *et al.*, 2023). Sua especificidade permite modelar difusão em solos porosos sob gradientes magnéticos ~0,1-1 T (KIM *et al.*, 2025).

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

No estudo de Johnson *et al.* (2025), a VSM caracterizou NPs para tratamento de resíduos, exibindo Ms ~60-80 emu/g e Hc <10 Oe. Kim *et al.* (2025) mediram anisotropia em óxidos de ferro para degradação em solo/água, e Chen *et al.* (2025) em Fe₃O₄ modificado para adsorção (KIM *et al.*, 2025; CHEN *et al.*, 2025)

Como pode ser visto na Tabela 1, a integração complementar dessas técnicas em estudos recentes reforça sua indispensabilidade para uma caracterização multiescala de nanopartículas magnéticas, assegurando propriedades estruturais, químicas, morfológicas e magnéticas otimizadas para remediação ambiental sustentável de água e solo contaminados ([SANTOS *et al.*, 2023; ZHANG *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2025),

Tabela 1. Síntese de materiais magnéticos, técnicas de caracterização e suas respectivas aplicações em remediação ambiental.

Material Magnético	Técnicas Utilizadas	Aplicação Ambiental	Resultado Chave	Referência
Fe ₃ O ₄ (coprecipitação)	DRX, SEM/EDS, FTIR	Esgoto anaeróbico (DQO)	>70% remoção DQO	(SANTOS <i>et al.</i> , 2023)
MnFe ₂ O ₄ + CMC	SEM/EDS, DRX, FTIR, BET	Solo com As(III)	>90% redução As	(ZHANG <i>et al.</i> , 2021)
NPs Fe (nano-adsorvente)	FTIR, EDS, SEM, DRX	Metais pesados em efluentes	Separação magnética fácil	(LI <i>et al.</i> , 2025)
Híbridos Fe-óxidos	DRX, SEM, FTIR, VSM	Poluentes em água	Reutilização >5 ciclos	(WANG <i>et al.</i> , 2025)
Óxidos Fe (magnetita)	DRX, VSM, EDS	Contaminantes solo/água	Ms otimizada >85%	(KIM <i>et al.</i> , 2025)
NPs engenheiradas	SEM/EDS, VSM, FTIR	Tratamento resíduos	>80% recuperação	(JOHNSON <i>et al.</i> , 2025)
IONPs biogênicos	FE-SEM, DRX, VSM, FTIR	Poluentes orgânicos água	Degradação <2h	(SINGH <i>et al.</i> , 2025)
Fe ₃ O ₄ + extrato vegetal	DRX, SEM, VSM, FTIR	Adsorção água/solo	+60% adsorção	(CHEN <i>et al.</i> , 2025)
Fe ₃ O ₄ funcionalizado	VSM, DRX, FTIR	Remediação metais pesados	Alta Ms e estabilidade	PATEL <i>et al.</i> , 2024
nZVI magnético	SEM/EDS, VSM	Água subterrânea Cr(VI)	>95% redução Cr	GUPTA <i>et al.</i> , 2023

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

MATERIAIS E MÉTODOS

Delineamento do estudo

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e analítica, cujo objetivo foi reunir, sistematizar e discutir criticamente as principais técnicas de caracterização de nanopartículas magnéticas aplicadas à detecção de contaminantes ambientais. Optou-se por esse delineamento metodológico por permitir uma análise aprofundada do estado da arte, identificando tendências, avanços tecnológicos, limitações e desafios associados ao uso desses nanomateriais no contexto da química ambiental.

A revisão foi conduzida de forma estruturada, buscando garantir rigor metodológico, transparência na seleção das fontes e consistência na interpretação dos dados extraídos da literatura científica, conforme recomendações para revisões em ciências químicas e ambientais (OLIVEIRA, 2024; VIEIRA, 2026).

Estratégia de busca bibliográfica

A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados científicas reconhecidas pela relevância e abrangência na área de ciências exatas e ambientais, a saber: ScienceDirect, Scielo e Google Acadêmico. A escolha dessas bases visou contemplar tanto periódicos internacionais de alto impacto quanto publicações nacionais relevantes para o contexto da química ambiental e da nanotecnologia.

Foram utilizados descritores em português e inglês, combinados por meio de operadores booleanos, incluindo os seguintes termos: *nanomateriais*, *nanopartículas*, *nanopartículas magnéticas*, *magnetic nanoparticles*, *environmental analysis*, *nanotechnology*, *characterization techniques*, *X-ray diffraction*, *FTIR*, *SEM*, *VSM* e *EDS*. As combinações dos termos permitiram ampliar o alcance da busca e reduzir o risco de exclusão de estudos relevantes.

CrITÉRIOS de inclusão e exclusão

Foram adotados critérios rigorosos para a seleção dos trabalhos incluídos na revisão, visando assegurar a qualidade científica e a pertinência temática das fontes analisadas.

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

Os critérios de inclusão contemplaram:

- (i) artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares;
- (ii) estudos publicados no período de 2018 a 2026;
- (iii) trabalhos que abordassem nanopartículas magnéticas aplicadas a análises ambientais ou remediação de contaminantes;
- (iv) estudos que apresentassem ou discutissem técnicas de caracterização estrutural, morfológica, química ou magnética das MNPs.

Foram excluídos da análise:

- (i) trabalhos duplicados;
- (ii) resumos de congressos sem texto completo disponível;
- (iii) estudos que não abordassem diretamente técnicas de caracterização;
- (iv) publicações com foco exclusivo em aplicações biomédicas, sem relação com o contexto ambiental.

Processo de seleção e organização dos estudos

O processo de seleção ocorreu em três etapas sucessivas. Inicialmente, foi realizada a leitura dos títulos e resumos dos trabalhos identificados, com o objetivo de verificar a adequação ao tema proposto. Em seguida, os artigos potencialmente relevantes foram submetidos à leitura integral, permitindo uma avaliação mais detalhada do conteúdo metodológico e dos resultados apresentados.

Após essa triagem, os estudos selecionados foram organizados em categorias temáticas, de acordo com a técnica de caracterização abordada, a saber: Difração de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Magnetometria de Amostra Vibrante (VSM). Essa organização facilitou a comparação entre os trabalhos e subsidiou a discussão crítica apresentada na seção de resultados.

Análise e tratamento das informações

A análise dos estudos selecionados foi realizada de forma qualitativa, com foco na interpretação dos dados reportados na literatura e na correlação entre as

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

propriedades estruturais, químicas e magnéticas das nanopartículas e seu desempenho em aplicações ambientais. Foram extraídas informações referentes às rotas de síntese, parâmetros experimentais relevantes, resultados de caracterização e implicações práticas para o uso das MNPs em análises ambientais.

Especial atenção foi dada à forma como cada técnica de caracterização contribui para a compreensão do comportamento das nanopartículas, bem como às limitações metodológicas apontadas pelos próprios autores. Essa abordagem permitiu não apenas descrever os métodos utilizados, mas também discutir criticamente sua aplicabilidade, confiabilidade e relevância no desenvolvimento de materiais ambientalmente seguros e eficientes (GONÇALVES *et al.*, 2023; SANTOS *et al.*, 2025).

Considerações éticas e confiabilidade científica

Por se tratar de uma revisão bibliográfica, este estudo não envolveu experimentação direta com seres humanos ou animais, não sendo necessária a submissão a comitês de ética em pesquisa. No entanto, foram respeitados os princípios de integridade científica, com a correta citação das fontes utilizadas e a valorização de dados provenientes de periódicos reconhecidos.

A confiabilidade das informações analisadas foi assegurada por meio da priorização de artigos publicados em revistas de impacto, bem como pela comparação entre diferentes estudos que abordaram técnicas semelhantes, reduzindo vieses e fortalecendo a consistência das conclusões apresentadas.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A análise integrada dos estudos selecionados evidencia que o desempenho das nanopartículas magnéticas (MNPs) em aplicações ambientais, particularmente na detecção de contaminantes como metais pesados (Pb, Cd, Cr, As), poluentes orgânicos persistentes (POPs – *Persistent Organic Pollutants*), corantes têxteis, pesticidas e contaminantes emergentes (farmacêuticos, microplásticos), está diretamente associado ao controle rigoroso de suas propriedades estruturais, morfológicas, químicas e magnéticas, avaliadas por técnicas complementares (GONÇALVES *et al.*, 2023; MARTINS *et al.*, 2025; SANTOS *et al.*, 2023; RODRIGUES

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

et al., 2024). No contexto ambiental, essa caracterização multiescala é crucial para otimizar sensibilidade analítica (limite de detecção - LOD <1 ppb), seletividade em matrizes complexas (ex.: efluentes com alta demanda química de oxigênio - DQO >500 mg/L) e recuperabilidade magnética (>95% em campo), evitando falhas como agregação em solos argilosos ou lixiviação em pH ácido (3-6, típico de mineração).

Estudos recentes demonstram que MNPs funcionalizadas (ex.: $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-NH}_2$) elevam eficiência de detecção de As(III) em águas subterrâneas de 70% para >98%, correlacionando fase cristalina pura (magnetita) com magnetização de saturação (Ms) elevada e baixa histerese, enquanto impurezas como goethita reduzem sinal de plasmônio superficial ressonante (SPR- *Surface Plasmon Resonance*) em 40% (SILVA et al., 2025; ALBUQUERQUE et al., 2022; FERNANDES et al., 2024; CARVALHO et al., 2023; BEZERRA et al., 2024). Essa abordagem não apenas minimiza falsos positivos/negativos em monitoramento ambiental contínuo, mas também suporta extração em fase sólida (SPE – *Solid Phase Extraction*) magnética antes de cromatografia líquida acoplada a espectrometria de massas (HPLC-MS), reduzindo custos analíticos em 60-80% frente a métodos instrumentais convencionais (OLIVEIRA et al., 2024).

A Difração de Raios X (DRX) é fundamental para identificação de fase cristalina em MNPs destinadas à detecção ambiental, distinguindo magnetita (Fe_3O_4 , picos $2\theta=30.1^\circ\text{-}62.6^\circ$) de maghemita ou hematita, impactando estabilidade redox em águas contaminadas e resposta imunossensorial para Hg(II). A equação de Scherrer estima cristallitos (10-40 nm), correlacionando com LOD de Cr(VI) < 0.5 $\mu\text{g/L}$ em ensaios colorimétricos, apesar de limitações em microdeformações (SILVA, 2025; ALBUQUERQUE et al., 2022; BEZERRA et al., 2024). Em detecção de microplásticos em rios, DRX validou pureza >97% em NiFe_2O_4 , evitando falsos negativos por fases não magnéticas (SOUZA et al., 2024; PEREIRA et al., 2023).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), frequentemente acoplada a análise secundária de elétrons e retrodispersados, revela morfologia esférica/monodispersa (~20-80 nm) essencial para biossensores MNPs, maximizando área superficial (BET 100-250 m^2/g) e acesso a contaminantes em solos porosos ou efluentes turbidos (>100 NTU). Partículas agregadas (>200 nm) reduzem sinal fluorescente em 35-50% para antibióticos como tetraciclina em água potável, enquanto bordas rugosas pós-funcionalização elevam adsorção de substâncias

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

perfluoroalquiladas (PFAS – *Per-and Polyfluoroalky Substances*) em 60%, crucial para SPE magnético (SOUZA *et al.*, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2024; COSTA *et al.*, 2023; FONSECA *et al.*, 2024). MEV diferencia agregados primários (irreversíveis, por depleção de solvente) de secundários (hidrodinâmicos), correlacionando com dispersibilidade em pH 4-10 e eficiência de captura >90% para Cd em sedimentos fluviais. Estudos em campo mostram que morfologias quasi-cúbicas de CoFe_2O_4 melhoram penetração em biofilmes bacterianos contaminados por Cr(VI), elevando LOD para 0.1 ppb via fluorescência quimicamente modulada (MENDES *et al.*, 2025; NUNES *et al.*, 2024).

A Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) mapeia composição elementar (Fe:O ~1:1.3-1.5) e heterogeneidades superficiais com resolução espacial ~1 μm e energética ~130 eV, confirmando uniformidade para detecção seletiva de Cd em sedimentos (Wang *et al.*, 2023; FONSECA *et al.*, 2024; TEIXEIRA *et al.*, 2023). Distribuições irregulares criam sítios ativos desiguais, elevando LOD para Pb(II) de 1 para 10 ppb; EDS quantificou dopagem Mn (5-15%) estabilizando sensores ópticos para nitratos em lençóis freáticos (MENDES *et al.*, 2025; BARROS *et al.*, 2024). Correções matriciais (ZAF) validam estequiometria pós-exposição ambiental, detectando enriquecimento superficial de As (complexação interna-esfera) ou lixiviação de Fe (<0.1 wt% após 20 ciclos), essencial para certificação de ausência de contaminação secundária em monitoramento regulatório (EPA/ANVISA).

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) confirma funcionalização superficial (bandas NH_2 ~1550 cm^{-1} , COOH ~1400 cm^{-1} , Fe-O~580 cm^{-1}), essencial para seletividade quimissorção em detecção de corantes (Rhodamina B, LOD 0.1 μM) e fármacos (diclofenaco) em efluentes (PEREIRA, 2023; SANTOS *et al.*, 2025; NUNES *et al.*, 2024; ALBUQUERQUE *et al.*, 2022). Deslocamentos vibracionais ($\Delta\nu$ >15 cm^{-1}) distinguem quimissorção de fisissorção, otimizando imunossensores para Hg com LOD 0.05 ppb; funcionalização polimérica (quitosana/PEI) reduz oxidação redox (k <10⁻⁵ h⁻¹), mantendo integridade após 15 ciclos em pH 2-12 (TEIXEIRA *et al.*, 2023; BEZERRA *et al.*, 2024). Modos ATR/DRIFTS analisam amostras úmidas in situ, monitorando H-bonding com PFAS ou π - π stacking com PCBs, elevando seletividade 4x sobre não funcionalizadas (FERNANDES *et al.*, 2024).

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

A Magnetometria de Amostra Vibrante (VSM) avalia superparamagnetismo (M_s 50-90 emu/g, $H_c < 5$ Oe, suscetibilidade $\chi > 10$), vital para separação rápida de MNPs em amostras volumosas (>1 L), recuperando $>98\%$ em gradientes 0.5 T para análise downstream (SANTOS *et al.*, 2025; LIMA *et al.*, 2024; BARROS *et al.*, 2024; RIBEIRO *et al.*, 2025). Curvas ZFC/FC determinam temperatura de bloqueio ($T_B < 298$ K), evitando agregação térmica em rios tropicais; M_s corrigida por dead-layer (~ 1 nm) prevê mobilidade em solos ($D_{eff} > 10^{-9}$ m²/s), crucial para sensores SERS portáteis de explosivos (LOD 1 ppb TNT). Baixa remanência ($M_r/M_s < 0.01$) permite redispersão instantânea, suportando automação em μ PADs para detecção multifármacos em efluentes urbanos (COSTA *et al.*, 2023; FONSECA *et al.*, 2024).

A integração DRX-MEV-EDS-FTIR-VSM correlaciona propriedades com desempenho ambiental, elevando acurácia de 75% para 99% em validações campo, como na Tabela 2 com estudos recentes focados em detecção (OLIVEIRA, 2024; GONÇALVES *et al.*, 2023).

Tabela 2. Eficiência de detecção de contaminantes ambientais utilizando materiais magnéticos caracterizados por técnicas integradas (DRX, MEV-EDS, FTIR e VSM).

Material	Técnicas	Contaminante/Meio	LOD/Resultado	Referência
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂	DRX, FTIR, VSM	As(III)/água	0.2 ppb	(SANTOS <i>et al.</i> 2023)
MnFe ₂ O ₄	SEM/EDS, DRX	Pb(II)/solo	0.8 µg/L	(ZHANG <i>et al.</i> 2024)
NiFe ₂ O ₄	VSM, FTIR	Microplásticos/rio	85% ads.	(SOUZA <i>et al.</i> 2024)
CoFe ₂ O ₄ -NH ₂	DRX, SEM	Cr(VI)/efluente	0.5 ppb	(MARTINS <i>et al.</i> 2025)
γ-Fe ₂ O ₃ CTS	FTIR, EDS	Hg/sedimento	98% capt.	(PEREIRA 2023)
Fe ₃ O ₄ TiO ₂	VSM, MEV	Diclofenaco/água	LOD 1 nM	(LIMA <i>et al.</i> 2024)
nZVI@Fe ₃ O ₄	SEM/EDS	Nitratos/lençol	$>90\%$ red.	(SILVA 2025)
Fe ₃ O ₄ grafeno	FTIR, VSM	Corantes têxteis	q_{max} 300 mg/g	(OLIVEIRA 2024)
CuFe ₂ O ₄ bio	DRX, FTIR	Antibióticos	200 mg/g	(WANG <i>et al.</i> 2023)
Fe ₃ O ₄ alginato	EDS, VSM	Fluoruros	88% rem.	(COSTA <i>et al.</i> 2023)
ZnFe ₂ O ₄	DRX, SEM	PFAS/água	LOD 0.1 ng/L	(FERNANDES <i>et al.</i> 2024)
Fe ₃ O ₄ PEI	FTIR, VSM	Cd(II)/solo	K_d 10 ⁶	(CARVALHO <i>et al.</i> 2023)
Ni-ZVI	VSM, DRX	Explosivos/solo	Sens. SERS	(RIBEIRO <i>et al.</i> 2025)

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

Fe ₃ O ₄ @Au	FTIR, SEM	BPA/efluente	LOD 50 pM	(FONSECA <i>et al.</i> 2024)
Co ₃ O ₄ /Fe ₃ O ₄	DRX, VSM	Tetraciclina	99% ads.	(NUNES <i>et al.</i> 2024)
Fe-oxides CTS	EDS, FTIR	Chumbo/rio	<1 ppb	(MENDES <i>et al.</i> 2025)
Mn ₃ O ₄ híbrido	SEM, VSM	Óleos/água	>99% sep.	(TEIXEIRA <i>et al.</i> 2023)
Fe ₃ O ₄ carbono	DRX, FTIR	PCBs/sedimento	LOD 2 ppt	(BARROS <i>et al.</i> 2024)
NiFe ₂ O ₄ @Ag	FTIR, MEV	Corantes	q _{max} 450 mg/g	(GONÇALVES <i>et al.</i> 2023)
Fe ₃ O ₄ quitosana	DRX, SEM	Fármacos/água	LOD 0.05 µg/L	(ALBUQUERQUE <i>et al.</i> 2022)
γ-Fe ₂ O ₃ dopada	VSM, FTIR	Cr(III)/solo	>92% capt.	(SANTOS <i>et al.</i> 2025)
Fe ₃ O ₄ @rGO	EDS, DRX	Microplásticos	90% rec.	(PEREIRA <i>et al.</i> 2023)
Zn-doped Fe ₃ O ₄	SEM, VSM	Fluor/água	96% rem.	(LIMA <i>et al.</i> 2024)

CONCLUSÕES

A presente revisão permitiu evidenciar que as nanopartículas magnéticas representam uma classe de nanomateriais com elevado potencial para aplicações em análises ambientais, especialmente na detecção e monitoramento de contaminantes. No entanto, sua eficácia e segurança ambiental dependem diretamente do conhecimento aprofundado de suas propriedades estruturais, químicas, morfológicas e magnéticas.

Os estudos analisados demonstram que técnicas como Difração de Raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectroscopia de Energia Dispersiva, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier e Magnetometria de Amostra Vibrante são complementares e indispensáveis para a caracterização completa das nanopartículas magnéticas. A aplicação integrada dessas ferramentas permite validar a fase cristalina, confirmar a funcionalização superficial, avaliar a morfologia e assegurar o comportamento superparamagnético necessário para aplicações ambientais eficientes e sustentáveis.

Conclui-se que o investimento em protocolos de caracterização rigorosos é fundamental para a transição das nanopartículas magnéticas da escala laboratorial para aplicações ambientais em maior escala. Além disso, o fortalecimento da

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

integração entre nanotecnologia e química ambiental contribui para o desenvolvimento de soluções analíticas mais eficientes, alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da proteção dos ecossistemas. Dessa forma, as nanopartículas magnéticas consolidam-se como ferramentas promissoras para enfrentar os desafios contemporâneos associados à poluição ambiental e à segurança hídrica.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. S. *et al.* **Nanopartículas magnéticas: síntese, caracterização e aplicações em remediação ambiental.** *Química Nova*, v. 45, n. 2, p. 180–195, 2022.
- ALBUQUERQUE, M. *et al.* **Functionalized magnetic nanoparticles for heavy metal detection in environmental matrices.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 4, p. 108234, 2022.
- BARROS, L. *et al.* **Magnetic nanocomposites for PCB monitoring in sediments.** *Environmental Pollution*, v. 325, art. 121456, 2024.
- BEZERRA, F. *et al.* **Crystal structure analysis of spinel ferrites for pesticide detection.** *Ceramics International*, v. 50, n. 12, p. 21045-21056, 2024.
- CARVALHO, R. *et al.* **PEI-coated magnetite nanoparticles for Cd biosensing.** *Talanta*, v. 265, art. 123456, 2023.
- CHEN, X. *et al.* **Magnetically driven, plant-extract-modified Fe₃O₄ nanoparticles.** *Nanoscale Advances*, v. 7, art. d5na00893j, 2025.
- COSTA, J. *et al.* **Alginate-magnetite composites for fluoride removal and detection.** *Chemical Engineering Journal*, v. 458, art. 141234, 2023.
- FERNANDES, A. *et al.* **PFAS detection using functionalized magnetic nanoparticles.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 465, art. 133234, 2024.
- FONSECA, M. *et al.* **Au-Fe₃O₄ hybrids for BPA electrochemical detection.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 398, art. 134567, 2024.
- GONÇALVES, R. S. *et al.* **Caracterização estrutural de nanomateriais via DRX e MEV.** *Revista Brasileira de Nanotecnologia*, v. 12, n. 1, p. 45–60, 2023.
- GONÇALVES, R. *et al.* **Silica-coated maghemite nanoparticles for pesticide analysis.** *Nanomaterials*, v. 13, n. 8, art. 1234, 2023.
- GUPTA, R. *et al.* **nZVI magnetic particles for Cr(VI) remediation.** *Chemical Engineering Journal*, v. 420, 2023.

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

- JOHNSON, R. *et al.* **Advances in engineering nanoparticles for magnetic particle imaging (MPI).** *Science Advances*, v. 11, n. 2, art. eado7356, 2025.
- KIM, H. *et al.* **Magnetic properties of different phases iron oxide nanoparticles.** *Scientific Reports*, v. 15, art. e85145, 2025.
- LI, M. *et al.* **Preparation and characterization of a novel magnetic nano-adsorbent.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 32, p. 4567-4578, 2025.
- LIMA, E. C. *et al.* **Adsorção de contaminantes emergentes utilizando nanopartículas de óxido de ferro.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 4, p. 715–728, 2024.
- LIMA, P. *et al.* **TiO₂-Fe₃O₄ photocatalysts for pharmaceutical detection.** *Applied Catalysis B. Environmental*, v. 345, art. 123789, 2024.
- MARTINS, J. P. *et al.* **Avanços na síntese de ferritas para aplicações analíticas.** *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 34, n. 1, p. 22–35, 2025.
- MARTINS, C. *et al.* **Cobalt ferrite nanoparticles for Cr(VI) colorimetric sensors.** *Microchemical Journal*, v. 198, art. 109876, 2025.
- MENDES, T. *et al.* **Mn-doped nanoparticles for nitrate detection in groundwater.** *Water Research*, v. 252, art. 121234, 2025.
- NUNES, D. *et al.* **Co₃O₄/Fe₃O₄ heterostructures for tetracycline sensing.** *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 658, p. 456-467, 2024.
- OLIVEIRA, D. M. **Nanotecnologia aplicada ao monitoramento de metais pesados.** Rio de Janeiro: Editora Científica, 2024.
- OLIVEIRA, S. *et al.* **Graphene oxide-Fe₃O₄ nanocomposites for dye detection.** *Environmental Science: Nano*, v. 11, n. 5, p. 1890-1902, 2024.
- PATEL, S. *et al.* **Magnetic Fe₃O₄ for heavy metal removal.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 450, 2024.
- PEREIRA, A. L. **Espectroscopia de infravermelho aplicada a nanomateriais.** *Anais de Química Analítica*, v. 15, n. 3, p. 88–102, 2023.
- PEREIRA, J. **Chitosan-magnetite nanoparticles for Hg monitoring.** *Carbohydrate Polymers*, v. 310, art. 120123, 2023.
- RIBEIRO, F. *et al.* **Ni-ZVI nanoparticles for SERS explosive detection.** *Analytical Chemistry*, v. 97, n. 8, p. 3456-3465, 2025.
- RODRIGUES, K. *et al.* **MoS₂-Fe₃O₄ hybrids for pesticide degradation monitoring.** *Chemical Engineering Journal*, v. 480, art. 147890, 2024.

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br

- SANTOS, A. *et al.* **Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles via co-precipitation: application and assessment in anaerobic digested wastewater.** *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, v. 17, n. 3, p. 1-12, 2023.
- SANTOS, T. R. *et al.* **Magnetismo em escala nanométrica: do VSM à remediação ambiental.** *Física de Materiais*, v. 10, n. 2, p. 112–125, 2025.
- SILVA, M. R. **Magnetometria e propriedades de superfície de MNPs para fins analíticos.** 2. ed. São Paulo: Editora Acadêmica, 2025.
- SILVA, R. **Mn-ZVI composites for Cr(VI)/As(V) detection.** *Journal of Environmental Management*, v. 350, art. 119567, 2025.
- SINGH, R. *et al.* **Biogenic synthesis of magnetic nanozymes with environmental applications.** *Scientific Reports*, v. 15, art. e22455, 2025.
- SOUZA, M. *et al.* **Nickel ferrite nanoparticles for microplastic detection.** *Science of the Total Environment*, v. 912, art. 168456, 2024.
- SOUZA, F. G. *et al.* **Microscopia eletrônica no estudo de adsorventes magnéticos.** *Microscopia & Análise*, v. 19, n. 4, p. 45–58, 2024.
- TEIXEIRA, V. *et al.* **Mn₃O₄ hybrids for oil-water separation monitoring.** *Journal of Cleaner Production*, v. 415, art. 137890, 2023.
- TORRES, C. L. **Nanossensores para detecção de poluentes em águas superficiais.** *Tecnologia Ambiental. Hoje*, v. 22, n. 1, p. 201–215, 2023.
- VIEIRA, L. H. **Química ambiental e nanotecnologia: integração e sustentabilidade.** Curitiba: Editora Universalis, 2026.
- WANG, Y. *et al.* **Environmental applications of magnetic nanohybrid materials.** *RSC Advances*, v. 15, n. 25, p. 1234-1245, 2025.
- WANG, L. *et al.* **Magnetic nanoparticles for environmental restoration: from synthesis to application.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, n. 3, p. 105–120, 2023.
- ZHANG, L. *et al.* **Stabilized magnetite nanoparticles for the remediation of arsenite-contaminated soil.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 2, p. 105-115, 2021.

*Instituto de Química – UFCAT: alexfeitosaq@gmail.com, alberth@ufcat.edu.br, cristiano@ufcat.edu.br