

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E
TECNOLOGIA AMBIENTAL**

SABRINA BELONI VAZ

EXTRATO DE ERVA-MATE APLICADO NA PRODUÇÃO DE
NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE FERRO MAGNÉTICAS:
DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS PARA A
DESCOLORAÇÃO DO CORANTE AMARANTO

Sabrina Beloni Vaz

**EXTRATO DE ERVA-MATE APLICADO NA PRODUÇÃO DE
NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE FERRO MAGNÉTICAS:
DESENVOLVIMENTO DE ESTRATÉGIAS PARA A DESCOLORAÇÃO
DO CORANTE AMARANTO**

Dissertação ou Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado ou Doutorado, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para o título de Doutor em Tecnologia Ambiental.

Orientador (a): Prof.^(a) Dr (a). Lisianne Brittes Benitez

Santa Cruz do Sul

2024

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	Erro! Indicador não definido.
2.1	Objetivo Geral.....	Erro! Indicador não definido.
2.2	Objetivos específicos.....	Erro! Indicador não definido.
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	Erro! Indicador não definido.
3.1	Nanopartículas.....	Erro! Indicador não definido.
3.2	ARTIGO 1 – REMOÇÃO DE CORANTES AZOICOS POR NANOPARTÍCULAS.....	Erro! Indicador não definido.
3.3	Nanopartículas e degradação de corantes azo: mapa bibliométrico.....	Erro! Indicador não definido.
4	METODOLOGIA.....	Erro! Indicador não definido.
4.1	Delineamento da pesquisa.....	Erro! Indicador não definido.
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	Erro! Indicador não definido.
5.1	ARTIGO 2 – SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE FERRO USANDO EXTRATO DE <i>ILEX PARAGUANIENSIS</i> PARA REMOÇÃO DO CORANTE AZOICO AMARANTO	Erro! Indicador não definido.
5.2	ARTIGO 3 – BIODESCOLORAÇÃO DO CORANTE AZOICO AMARANTO POR CÉLULAS DE <i>BACILLUS</i> SP. ES-1 REVESTIDAS COM NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE FERRO.....	Erro! Indicador não definido.
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	Erro! Indicador não definido.
7	TRABALHOS FUTUROS.....	Erro! Indicador não definido.
8	REFERÊNCIAS	12

RESUMO

A contaminação de recursos hídricos por efluentes contendo corantes azoicos é um problema ambiental significativo. Esses compostos, amplamente utilizados nas indústrias alimentícia, têxtil e de papel, apresentam alta estabilidade e resistência à degradação, dificultando seu tratamento pelos métodos convencionais. Neste contexto, este trabalho investigou o uso de nanopartículas de óxido de ferro magnéticas, produzidas por síntese verde utilizando extrato de erva-mate como agente redutor (NPSV) e por coprecipitação alcalina revestida com extrato de erva mate (NPR) como alternativa sustentável para descolorir o corante azoico amaranth. O estudo também explorou a eficiência na descoloração do amaranth por células de *Bacillus* sp. ES-1, isolada de efluente industrial, imobilizadas com as NPR e por células livres da bactéria. As nanopartículas foram analisadas por meio de técnicas como microscopia eletrônica de transmissão (TEM), espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e espectroscopia de energia dispersiva de raios-x (EDS). Essas análises evidenciaram a presença de compostos bioativos do extrato de erva-mate na superfície das partículas. Nos estudos de adsorção, as NPR demonstraram maior eficiência, removendo 93% do corante em apenas 15 minutos, enquanto as NPSV alcançaram uma remoção de 39% após 24 horas. A análise dos modelos cinéticos revelou que o processo de adsorção pelas NPR seguiu o modelo de pseudo-segunda ordem. As análises espectroscópicas (UV-Vis e FT-IR) confirmaram a degradação do corante, evidenciada pela diminuição da absorvância e mudanças nos grupos funcionais. Enquanto as células livres de *Bacillus* sp. apresentaram maior eficiência inicial na descoloração, as células imobilizadas demonstraram desempenho equivalente ao longo do tempo. Este trabalho contribui de forma significativa para a ciência ambiental ao propor um método eficiente, sustentável e economicamente viável para o tratamento de efluentes industriais contendo o corante azoico amaranth. A utilização de recursos locais, como a erva-mate, e a integração com microrganismos destacam-se como avanços importantes. A pesquisa não só promove a proteção ambiental, mas também fortalece o campo acadêmico ao oferecer uma solução inovadora que pode ser aplicada em sistemas reais de tratamento de água.

INTRODUÇÃO

Existem diferentes maneiras de classificar os corantes sintéticos, levando em consideração sua estrutura química e suas aplicações. Os cromóforos, que são grupos de átomos responsáveis por conferir cor às moléculas, desempenham um papel fundamental nesse processo. Atualmente, existem cerca de vinte e cinco tipos de corantes que podem ser classificados de acordo com o seu grupo cromóforo, tais como azo (N=N) e nitro (NO₂), entre outros exemplos (VARJANI et al., 2021). Os corantes sintéticos são amplamente utilizados em diversas indústrias, incluindo a têxtil e a alimentícia (WANG et al., 2022a). Geralmente o grupo azo é ligado a anéis de naftaleno e benzeno, também podendo ser ligado a grupos alifáticos ou heterocíclicos aromáticos. A grande variação de cores dos corantes azoicos pode ser estudada pela estrutura complexa formada pelos grupamentos azo conjugados com substituintes aromáticos (AKANSHA et al., 2023).

O descarte de efluentes contaminados com corantes azoicos sem o devido tratamento nos corpos hídricos impede a penetração de luz solar, prejudicando a fotossíntese de plantas e animais aquáticos, além de afetar o mecanismo de transporte de oxigênio entre o ar e a água (DIHOM et al., 2022). As indústrias têxteis. Por exemplo, utilizam cerca de 100 L de água para o processo de tingimento de 1 kg de algodão puro (KHAN et al., 2022), gerando, dessa forma, consideráveis volumes de efluentes a serem tratados. Atualmente, uma variedade de técnicas tem sido empregada para o tratamento de águas residuárias. Entretanto, cada técnica apresenta limitações e vantagens, fatores como custo dos produtos químicos, composição e concentração dos corantes nas águas residuárias, custos operacionais e toxicidade para microrganismos determinam a viabilidade técnica e econômica de cada método, os subprodutos gerados durante o processo de degradação também são fatores importantes para escolha do processo de tratamento (SELVARAJ et al., 2021a).

Nas últimas décadas, o tratamento de efluentes contaminados com corante azo através de métodos biológicos tem se destacado por apresentar custos menores, maiores eficiências de descoloramento, além de serem mais ambientalmente amigáveis quando comparados a métodos físicos e químicos. Entretanto, este tipo de método apresenta como desvantagens tempos de retenção hidráulica mais longos, necessidade de menores concentrações iniciais de corante, controle de condições como temperatura e pH, assim como a possível geração de biomassa com alto teor de corante e necessidade de tratamento antes do descarte (QIN et al., 2021).

A biodegradação desses corantes geralmente tem como etapa inicial a clivagem da ligação azo sob condições anaeróbicas, com formação de aminas aromáticas que podem ser mineralizadas aerobiamente. Os processos envolvidos na biodegradação de corantes azo podem ser divididos em dois grupos: degradação aeróbia e anaeróbia. Esta última pode ser subdividida ainda em: Redução enzimática direta (através de enzimas redutoras); Redução biológica mediada/indireta (devido a condições redox geradas e utilização de como mediadores para processos de redução biológica); E ainda redução química (pela produção de compostos inorgânicos como ácido sulfídrico e íons ferrosos gerados por reações metabólicas). Nesse sentido, a transferência de elétrons entre doadores e receptores é um fator limitante e determinante de tempo, impactando no tempo de detenção hidráulico necessário para o tratamento biológico (SELVARAJ et al., 2021). Nesse contexto, a tecnologia de imobilização de células bacterianas em diferentes materiais suporte é uma alternativa para superar a geração de biomassa bacteriana, visto que esta técnica permite a reusabilidade e melhora a estabilidade de culturas puras, além de melhorar a eficiência do processo (NAZARI; JOOKAR KASHI, 2023).

A nanotecnologia vem ganhando destaque na comunidade científica devido a sua versatilidade de aplicação. Os nanomateriais podem ser preparados facilmente e modificados de acordo com a aplicação planejada (YADAV et al., 2021). A produção de nanopartículas pode ser categorizada em duas abordagens principais de acordo com o material precursor, de cima para baixo e de baixo para cima, o método de cima para baixo envolve a redução de tamanho de materiais para que pelo menos uma das dimensões do material seja reduzida para menos de 100 nm e o método de baixo para cima envolve reações químicas para a síntese de nanopartículas (GUPTA et al., 2023). Existem diversas abordagens para a síntese de nanopartículas, sendo os métodos químicos e físicos os mais prevalentes. No entanto, esses métodos demandam condições ambientais específicas, variando de acordo com o material precursor, e são conhecidos por serem dispendiosos, demorados e envolverem o uso de produtos químicos potencialmente tóxicos (SUPPIAH et al., 2023). Por outro lado, a síntese verde cria nanomateriais a partir de materiais biológicos, como folhas, sementes, flores, raízes e outros componentes vegetais, para criar partículas com uma variedade de formas e tamanhos. Desenvolvendo um processo ambientalmente amigável onde partes de plantas são utilizadas como agentes redutores e estabilizadores (KUMARI; PHOGAT; SHUKLA, 2023).

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é uma árvore nativa da América do Sul, as folhas secas e ramos de erva-mate são industrializados e utilizados para o preparo de bebidas populares,

como o “mate” e o “tererê”, os habitantes do Paraguai, Uruguai, Argentina e Brasil consomem quantidades significativas de erva-mate, na Argentina chegando a cerca de 6,4 kg de erva-mate per capita ao ano (GORDON-FALCONÍ et al., 2020). A erva-mate desempenha um importante papel econômico e social em muitas comunidades remotas no Brasil, aproximadamente 180 mil pequenos agricultores cultivam esta espécie (MOTTA et al., 2020). A popularidade do uso da erva-mate é devido às suas propriedades antioxidantes, diuréticas e medicinais (DAHLEM et al., 2019). Ela apresenta principalmente como substâncias bioativas em extratos aquosos os ácidos cafeico e clorogênico e seus derivados (DELADINO et al., 2015).

O uso de nanopartículas combinadas com tratamentos biológicos é uma tecnologia nova que busca melhorar eficiência dos processos biológicos, melhorando a transferência de elétrons durante a clivagem da ligação azo e conseqüentemente diminuindo o tempo de retenção hidráulica. As nanopartículas mais utilizadas nesses casos são as de ferro, devido à baixa ação antimicrobiana das nanopartículas de ferro em relação as outras nanopartículas metálicas, como nanopartículas de prata ou zinco por exemplo (ALSAMMAN et al., 2023). Embora a transferência de elétrons mediada por nanopartículas possa ser uma alternativa promissora para a melhoria da biodegradação de corantes azoicos, alguns parâmetros operacionais devem ser estudados para o desenvolvimento dessa tecnologia na prática, como a influência da dose de nanopartículas sobre a atividade microbiana (NAZARI; JOOKAR KASHI, 2023).

Com isso, para diminuir essas lacunas de conhecimento, torna-se necessário melhor avaliar a biodescoloração de corantes utilizando microorganismos consorciados ou não com nanopartículas. Nesse sentido, no desenvolvimento desta pesquisa buscou-se a identificação, influência e otimização dos parâmetros na descoloração do amarantho com uma bactéria (*Bacillus* sp.) de forma individualizada e em consórcio com nanopartículas de ferro produzidas por síntese verde através do extrato de erva-mate. Esta cepa bacteriana foi selecionada em testes preliminares através de ensaios de isolamento de bactérias presentes em efluentes reais de indústria alimentícia, uma vez que estes efluentes industriais se caracterizam por possuir elevadas concentrações de corantes azo e outros em sua composição. Enquanto isso, a erva-mate foi escolhida por ser um material acessível e bastante disponível na região de desenvolvimento da pesquisa, além de apresentar em sua composição polifenóis que podem auxiliar no desempenho de descoloração.

Inicialmente, uma das principais preocupações foi fortalecer o embasamento teórico por meio de referências científicas que pudessem consolidar as informações relacionadas aos temas

abordados neste estudo. Com base nos objetivos estabelecidos, a pesquisa foi conduzida de forma a produzir três artigos científicos. O primeiro artigo se concentra na fundamentação teórica da pesquisa e consiste em uma análise bibliométrica da literatura científica especializada sobre a remediação de corantes azo com o uso de nanopartículas, a fim de fundamentar a pesquisa experimental. Já o segundo e terceiro artigo abordam as pesquisas experimentais desenvolvidas no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A. et al. Bio-composite of Fe-sludge biochar immobilized with *Bacillus Sp.* in packed column for bio-adsorption of Methylene blue in a hybrid treatment system: Isotherm and kinetic evaluation. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101734, 2021.

AHMOUDA, K.; BOUDIAF, M.; BARANI, D. The activity of iron oxide NPs against Congo red adsorption: the impact of environmental synthesis on surface hydroxyl groups. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2023.

AKANSHA, K. et al. Microbe-mediated remediation of dyes: Current status and future challenges. **Journal of Applied Biology and Biotechnology**, v. 11, n. 4, p. 1–23, 2023.

AKBARMEMHR, A. et al. Microencapsulation of Yerba mate extract: The efficacy of polysaccharide/protein hydrocolloids on physical, microstructural, functional, and antioxidant properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 234, p. 123678, 2023.

ALEX MBACHU, C. et al. Green synthesis of iron oxide nanoparticles by Taguchi design of experiment method for effective adsorption of methylene blue and methyl orange from textile wastewater. **Results in Engineering**, v. 19, 2023.

ALSAMMAN, A. M. et al. Elimination of pathogenic multidrug resistant isolates through different metal oxide nanoparticles synthesized from organic plant and microbial sources. **Microbial Pathogenesis**, v. 178, 2023.

ALTAMMAR, K. A. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, 2023.

AMEEN, F.; DAWOUD, T.; ALNADHARI, S. Ecofriendly and low-cost synthesis of ZnO nanoparticles from *Acremonium potronii* for the photocatalytic degradation of azo dyes. **Environmental Research**, v. 202, 2021.

AMINUDDIN, N. F.; NAWI, M. A.; BHRUDIN, N. N. Enhancing the optical properties of immobilized TiO₂/polyaniline bilayer photocatalyst for methyl orange decolorization. **Reactive and Functional Polymers**, v. 174, 2022.

ASIF, N. et al. Photocatalytic Degradation of Synthetic Dyes Using Cyanobacteria-Derived Zinc Oxide Nanoparticles. **BioNanoScience**, v. 13, n. 2, p. 365–375, 2023.

BASSI, A. et al. CuO Nanorods Immobilized Agar-Alginate Biopolymer: A Green Functional Material for Photocatalytic Degradation of Amaranth Dye. **Polymers**, v. 15, n. 3, 2023.

BEHPOUR, M. et al. Electrochemical and theoretical investigation on the corrosion inhibition of mild steel by thiosalicylaldehyde derivatives in hydrochloric acid solution. **Corrosion Science**, v. 50, n. 8, p. 2172–2181, 2008.

BEKHIT, F.; FARAG, S.; ATTIA, A. M. Decolorization and degradation of the Azo dye by bacterial cells coated with magnetic iron oxide nanoparticles. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, v. 14, 2020.

BEKHIT, F.; FARAG, S.; ATTIA, A. M. Characterization of Immobilized Magnetic Fe₃O₄ Nanoparticles on *Raoultella Ornithinolytica* sp. and Its Application for Azo Dye Removal. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 194, n. 12, p. 6068–6090, 2022.

BENKHAYA, S.; M'RABET, S.; EL HARFI, A. Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. **Heliyon**, v. 6, n. 1, p. e03271, 2020.

CAO, F.-T. et al. Performance and mechanisms exploration of nano zinc oxide (nZnO) on anaerobic decolorization by *Shewanella oneidensis* MR-1. *Chemosphere*, v. 305, 2022.

COLARES, G. S. et al. Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. **Science of the Total Environment**, 2020.

DAHLEM, M. A. et al. Evaluation of different methods for extraction of nanocellulose from yerba mate residues. **Carbohydrate Polymers**, v. 218, p. 78–86, 2019.

DE OLIVEIRA, J. P. et al. Characterization of aerogels as bioactive delivery vehicles produced through the valorization of yerba-mate (*Ilex paraguariensis*). **Food Hydrocolloids**, v. 107, p. 105931, 2020.

DELADINO, L. et al. Corn starch systems as carriers for yerba mate (*Ilex paraguariensis*) antioxidants. **Food and Bioproducts Processing**, v. 94, p. 463–472, 2015.

DIHOM, H. R. et al. Photocatalytic degradation of disperse azo dyes in textile wastewater using green zinc oxide nanoparticles synthesized in plant extract: A critical review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 47, p. 102705, 2022.

GORDON-FALCONÍ, C. et al. Synthesis of silver nanoparticles with remediative potential using discarded yerba mate: An eco-friendly approach. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 6, 2020.

GULLÓN, B. et al. Yerba mate waste: A sustainable resource of antioxidant compounds. **Industrial Crops and Products**, v. 113, p. 398–405, 2018.

GUPTA, D. et al. Green and sustainable synthesis of nanomaterials: Recent advancements and limitations. **Environmental Research**, v. 231, 2023.

HASAN, S. A review on nanoparticles: their synthesis and types. **Res. J. Recent Sci**, v. 2277, p. 2502, 2015.

HOSSEIN KHORASANIZADEH, M. et al. Schiff-base ligand assisted synthesis of DyVO₄/AgBr nanocomposites, characterization, and investigation of photocatalytic activity over organic dye contaminants. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 16, n. 8, p. 105020, 2023.

ISMAIL, M. et al. Catalytic reduction of picric acid, nitrophenols and organic azo dyes via green synthesized plant supported Ag nanoparticles. **Journal of Molecular Liquids**, v. 268, p. 87–101, 2018.

KAPOOR, R. T. et al. Exploiting microbial biomass in treating azo dyes contaminated wastewater: Mechanism of degradation and factors affecting microbial efficiency. **Journal of Water Process Engineering**, v. 43, p. 102255, 2021.

KHADER, E. H. et al. Decolourisation of Anionic Azo Dye in Industrial Wastewater Using Adsorption Process: Investigating Operating Parameters. **Environmental Processes**, v. 10, n. 2, 2023.

KHAN, R. R. M. et al. Biological and Photocatalytic Degradation of Congo Red, a Diazo Sulfonated Substituted Dye: a Review. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 233, n. 11, 2022.

KHAN, S. et al. Engineered nanoparticles for removal of pollutants from wastewater: Current status and future prospects of nanotechnology for remediation strategies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, 2021.

KUMAR, J. A. et al. A focus to green synthesis of metal/metal based oxide nanoparticles: Various mechanisms and applications towards ecological approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, p. 129198, 2021.

KUMARI, T.; PHOGAT, D.; SHUKLA, V. Exploring the multipotentiality of plant extracts for the green synthesis of iron nanoparticles: A study of adsorption capacity and dye degradation efficiency. **Environmental Research**, v. 229, 2023.

LEHL, H. K. et al. Decolourization and mineralization of Acid Red 27 metabolites by using multiple zoned aerobic and anaerobic constructed wetland reactor. **Desalination and Water Treatment**, v. 160, p. 81–93, 2019.

LEONE, G. et al. A comprehensive assessment of plastic remediation technologies. **Environment International**, v. 173, p. 107854, 2023.

LI, X. et al. Hierarchically structured particles for micro flow catalysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 326, 2017.

LIN, J. et al. Lanthanum-doped mesoporous magnetic carbon microspheres derived from *Camellia oleifera* shell biomass for phosphate removal from industrial wastewater. **Separation and Purification Technology**, v. 356, 2025.

LIU, K. et al. Enhanced degradation of azo dyes wastewater by S-scheme heterojunctions photocatalyst g-C₃N₄/MoS₂ intimately coupled *Rhodospseudomonas palustris* with chitosan modified polyurethane sponge carrier. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 58, p. 22319–22333, 2023.

LÓPEZ-CÓRDOBA, A. et al. Yerba mate antioxidant powders obtained by co-crystallization: Stability during storage. **Journal of Food Engineering**, v. 124, p. 158–165, 2014.

LU, W. et al. Economical, Green Synthesis of Fluorescent Carbon Nanoparticles and Their Use as Probes for Sensitive and Selective Detection of Mercury(II) Ions. **Analytical Chemistry**, v. 84, n. 12, p. 5351–5357, 19 jun. 2012.

MAHDI, M. A. et al. Green synthesis of DyBa₂Fe₃O_{7.988}/DyFeO₃ nanocomposites using almond extract with dual eco-friendly applications: Photocatalytic and antibacterial activities. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 31, p. 14319–14330, 2022.

MEHRZAD, M.; BEHPOUR, M.; KASHI, F. J. Novel environmental method for enhanced biodegradation of contaminated wastewater via immobilizing nanoparticles on a new bacterial strain isolated industrial textile. **Journal of Environmental Management**, v. 325, p. 116528, 2023.

MENG, X. et al. Synthesis, Characterization, and Utilization of a Lignin-Based Adsorbent for Effective Removal of Azo Dye from Aqueous Solution. **ACS Omega**, v. 5, n. 6, 2020.

MERCADO, D. F. et al. Ilex paraguariensis Extract-Coated Magnetite Nanoparticles: A Sustainable Nano-adsorbent and Antioxidant. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, v. 28, n. 2, p. 519–527, 2018.

MONJE, D. S. et al. Iron oxide nanoparticles embedded in organic microparticles from Yerba Mate useful for remediation of textile wastewater through a photo-Fenton treatment: Ilex paraguariensis as a platform of environmental interest – Part 1. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 38, p. 57127–57146, 2022.

MOTTA, A. C. V. et al. Elemental composition of yerba mate (Ilex paraguariensis A.St.-Hil.) under low input systems of southern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 736, p. 139637, 2020.

NAMAKKA, M. et al. A review of nanoparticle synthesis methods, classifications, applications, and characterization. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 20, p. 100900, 2023.

NAZAR DE SOUZA, A. P. et al. Green iron oxides/amino-functionalized MCM-41 composites as adsorbent for anionic azo dye: Kinetic and isotherm studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 105062, 2021.

NAZARI, N.; JOOKAR KASHI, F. A novel combination of immobilized Enterococcus casseliflavus sp. nov. with silver nanoparticles into a reusable matrix of Ca-Alg beads as a new strategy for biotreatment of Disperse Blue 183: Insights into metabolic characterization, biotoxicity, and mutagenic properties. **Journal of Environmental Management**, v. 325, 2023.

NGOUANGNA, E. N. et al. Surface modification of nanoparticles to improve oil recovery Mechanisms: A critical review of the methods, influencing Parameters, advances and prospects. **Journal of Molecular Liquids**, 2022.

NOMAN, M. et al. Use of biogenic copper nanoparticles synthesized from a native *Escherichia* sp. as photocatalysts for azo dye degradation and treatment of textile effluents. **Environmental Pollution**, v. 257, 2020.

OROUMI, G. et al. Introduction of $\text{Pr}_2\text{CrMnO}_6/\text{CrMn}_{1.5}\text{O}_4$ nanocomposites as a visible-light photocatalyst: Green sol-gel auto-combustion synthesis, structural characterization and comparative study. **Results in Engineering**, v. 21, 2024.

OYETADE, J. A.; MACHUNDA, R. L.; HILONGA, A. Photocatalytic degradation of azo dyes in textile wastewater by Polyaniline composite catalyst-a review. **Scientific African**, v. 17, p. e01305, 2022.

PARMAR, M.; SANYAL, M. Extensive study on plant mediated green synthesis of metal nanoparticles and their application for degradation of cationic and anionic dyes. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 17, p. 100624, 2022.

PATIL, D. J.; BEHERA, S. N. Synthesizing nanoparticles of zinc and copper ferrites and examining their potential to remove various organic dyes through comparative studies of kinetics, isotherms, and thermodynamics. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 5, 2023.

PAUK, V. et al. Origin of indigo colorants revealed by ion mobility spectrometry coupled to mass spectrometry followed by supervised classification. **Dyes and Pigments**, v. 197, p. 109943, 2022.

PERROTTI, T. C. et al. Green iron nanoparticles supported on amino-functionalized silica for removal of the dye methyl orange. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 4, 2019.

PI, Y. et al. The effective removal of Congo Red using a bio-nanocluster: Fe₃O₄ nanoclusters modified bacteria. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, 2022.

QIN, J. et al. Accelerated anaerobic biodecolorization of sulfonated azo dyes by magnetite nanoparticles as potential electron transfer mediators. **Chemosphere**, v. 263, p. 128048, 2021.

RAJASEKAR, R. et al. Ecofriendly synthesis of silver nanoparticles using *Heterotheca subaxillaris* flower and its catalytic performance on reduction of methyl orange. **Biochemical Engineering Journal**, v. 187, 2022.

ROSTAMZADEH, D.; SADEGHI, S. Ni doped zinc oxide nanoparticles supported bentonite clay for photocatalytic degradation of anionic and cationic synthetic dyes in water treatment. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 431, 2022.

SAIF, M. S. et al. Phyto-reflexive Zinc Oxide Nano-Flowers synthesis: An advanced photocatalytic degradation and infectious therapy. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 2375–2391, 2021.

SALAVATI-NIASARI, M.; DAVAR, F. Synthesis of copper and copper(I) oxide nanoparticles by thermal decomposition of a new precursor. **Materials Letters**, v. 63, n. 3, p. 441–443, 2009.

SARKAR, M. et al. Statistical optimization of bio-mediated silver nanoparticles synthesis for use in catalytic degradation of some azo dyes. **Chemical Physics Impact**, v. 3, p. 100053, 2021.

SELVARAJ, V. et al. An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications. **Journal of Molecular Structure**, v. 1224, 2021a.

SHARMA, S. C. D. et al. Decolorization of azo dye methyl red by suspended and co-immobilized bacterial cells with mediators anthraquinone-2,6-disulfonate and

Fe₃O₄ nanoparticles. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 112, p. 88–97, 2016.

SIJUMON, V. A.; ARAVIND, U. K.; ARAVINDAKUMAR, C. T. Degradation of Amaranth Dye Using Zero Valent Iron Nanoparticles: Optimal Conditions and Mechanism. **Environmental Engineering Science**, v. 34, n. 5, p. 376–383, 2017.

SINGH, N. et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using lychee peel and its application in anti-bacterial properties and CR dye removal from wastewater. **Chemosphere**, v. 327, 2023.

SRIRAM, G. et al. Recent trends in the application of metal-organic frameworks (MOFs) for the removal of toxic dyes and their removal mechanism-a review. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 31, p. e00378, 2022.

SUPPIAH, D. D. et al. Eco-friendly green synthesis approach and evaluation of environmental and biological applications of iron oxide nanoparticles. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 152, 2023.

SURESH, R. et al. Facile synthesis of CuO/g-C₃N₄ nanolayer composites with superior catalytic reductive degradation behavior. **Chemosphere**, v. 315, 2023.

SURTI, P.; KAILASA, S. K.; MUNGRAY, A. K. Enhancement of electrode properties using carbon dots functionalized magnetite nanoparticles for azo dye decolorization in microbial fuel cell. **Chemosphere**, v. 313, 2023.

SUZUKI, M. et al. Biological treatment of non-biodegradable azo-dye enhanced by zero-valent iron (ZVI) pre-treatment. **Chemosphere**, v. 259, 2020.

TANG, K. H. D. et al. Biological Removal of Dyes from Wastewater: A Review of Its Efficiency and Advances. **Tropical Aquatic and Soil Pollution**, v. 2, n. 1, 2022.

TEJASHWINI, D. M. et al. An in-depth exploration of eco-friendly synthesis methods for metal oxide nanoparticles and their role in photocatalysis for industrial dye degradation. **Chemical Physics Impact**, v. 7, p. 100355, 2023.

TURKTEN, N.; CINAR, Z. Photocatalytic decolorization of azo dyes on TiO₂: Prediction of mechanism via conceptual DFT. **Catalysis Today**, v. 287, p. 169–175, 2017.

VARADAVENKATESAN, T.; SELVARAJ, R.; VINAYAGAM, R. Phyto-synthesis of silver nanoparticles from *Mussaenda erythrophylla* leaf extract and their application in catalytic degradation of methyl orange dye. **Journal of Molecular Liquids**, v. 221, 2016.

VARJANI, S. et al. Microbial degradation of dyes: An overview. **Bioresource Technology**, v. 314, p. 123728, 2020.

VARJANI, S. et al. Trends in dye industry effluent treatment and recovery of value added products. **Journal of Water Process Engineering**, v. 39, p. 101734, 2021.

VINAYAK, A.; SINGH, G. B. Biodecolorization of reactive black 5 using magnetite nanoparticles coated *Bacillus* sp. RA5. (J. S. Chohan et al., Eds.) **Materials Today: Proceedings**. Anais...Elsevier Ltd, 2021. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85123296457&doi=10.1016%2fj.matpr.2021.09.425&partnerID=40&md5=68d521b59b1bc0e36373f6ac89055e69>>

VINAYAK, A.; SINGH, G. B. Decolorization of Reactive Black 5 by Immobilized Bacterial Cells. **ECS Transactions**. Anais...Institute of Physics, 2022. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85130535052&doi=10.1149%2f10701.11105ecst&partnerID=40&md5=03a3adb1385850cc9ae3f4f93b8e37c4>>

WANG, C. et al. Multi-dimensional optimization for a novel photocatalytic reactor incorporating the decolorization of azo dye and thermal management of ultraviolet light-emitting diode arrays. **Energy Conversion and Management**: X, v. 17, p. 100344, 2023.

WANG, J. et al. Recent Progress in Cobalt-Based Heterogeneous Catalysts for Electrochemical Water Splitting. **Advanced Materials**, v. 28, n. 2, p. 215–230, 2016.

WANG, T. et al. Green synthesis of Fe nanoparticles using eucalyptus leaf extracts for treatment of eutrophic wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 466–467, p. 210–213, 2014.

WANG, Y. et al. Enhanced degradation capability of white-rot fungi after short-term pre-exposure to silver ion: Performance and selectively antimicrobial mechanisms. **Science of the Total Environment**, v. 818, 2022a.

XU, W. et al. Insights into the Synthesis, types and application of iron Nanoparticles: The overlooked significance of environmental effects. *Environment International*, v. 158, p. 106980, 2022.

YADAV, N. et al. Detection and remediation of pollutants to maintain ecosustainability employing nanotechnology: A review. **Chemosphere**, v. 280, 2021.

YING, S. et al. Green synthesis of nanoparticles: Current developments and limitations. **Environmental Technology & Innovation**, v. 26, p. 102336, 2022.

YU, L. et al. Enhanced decolorization of methyl orange by *Bacillus* sp. strain with magnetic humic acid nanoparticles under high salt conditions. **Bioresource Technology**, v. 288, 2019.

ZHANG, X.-F. et al. Silver nanoparticles: Synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 17, n. 9, 2016.

ZHAO, W. et al. Efficient removal of cationic and anionic dyes by surfactant modified Fe₃O₄ nanoparticles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 633, 2022.

ZHU, L. et al. Unveiling the additive-assisted oriented growth of perovskite crystallite for high performance light-emitting diodes. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 2021.



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO E
DOUTORADO

TECNOLOGIA
AMBIENTAL



Av. Independência, 2293 - Universitário
Santa Cruz do Sul - RS
CEP 96815-900