

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A. C. SIMÕES
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
CIÊNCIAS BIOLÓGICAS – BACHARELADO

VINICIUS TEODORO DOS SANTOS

O USO DA NANOTECNOLOGIA NO COMBATE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS

Maceió

2019

VINICIUS TEODORO DOS SANTOS

O USO DA NANOTECNOLOGIA NO COMBATE À POLUIÇÃO DE ÁGUAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Ciências Biológicas.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Maria Queijeiro López.

Maceió

2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Girlaine da Silva Santos – CRB-4 – 1127

S237o Santos, Vinicius Teodoro dos.

O uso da nanotecnologia no combate à poluição de águas / Vinicius Teodoro dos Santos – 2024.
39 f.: il.

Orientadora: Ana Maria Queijeiro López.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Ciências Biológicas: Bacharelado) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 34-39.

1. Água - Poluição. 2. Biorremediação. 3. Nanopartículas. 4. Nanotecnologia. I. Título.

CDU: 579.68

Folha de Aprovação

VINICIUS TEODORO DOS SANTOS

O uso da nanotecnologia no combate à poluição de águas

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Alagoas e aprovado em 6 de setembro de 2019.

Documento assinado digitalmente
 ANA MARIA QUEIJEIRO LOPEZ
Data: 16/07/2024 11:02:56-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

(Orientadora – Professora Doutora, Ana Maria Queijeiro López, UFAL)

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ANA MARIA QUEIJEIRO LOPEZ
Data: 16/07/2024 20:34:01-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

(Examinadora Interna – Professora Doutora, Ana Maria Queijeiro López, UFAL)

Documento assinado digitalmente
 AMANDA LYS DOS SANTOS SILVA
Data: 16/07/2024 23:04:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

(Examinadora Interna – Doutora, Amanda Lys dos Santos Silva, UFAL)

Documento assinado digitalmente
 ELANE CRISTINA LOURENÇO DOS SANTOS
Data: 16/07/2024 14:27:18-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

(Examinadora Interna – Doutora, Elane Cristina Lourenço dos Santos, UFAL)

AGRADECIMENTOS

Ao povo brasileiro, pela oportunidade.

À UFAL, pela estrutura e assistência.

À Profa. Dra. Ana Maria Queijeiro López, pelo privilégio da orientação, confiança e incentivo.

Aos meus pais e irmã, pelo companheirismo de vida.

À minha filha e à minha companheira, pelo apoio e motivação.

Aos meus professores do ICBS, pela excelência nos ensinamentos.

Aos meus colegas de classe, pelo companheirismo.

RESUMO

A preservação e disponibilidade de água livre de poluição é uma das preocupações ambientais da atualidade, enfatizada no propósito do desenvolvimento sustentável do planeta. A nanotecnologia é um recurso relativamente novo que pode ser um grande aliado no combate à poluição das águas. Este trabalho de conclusão de graduação buscou produzir uma revisão que elencasse algumas das nanopartículas já utilizadas com sucesso no combate à poluição das águas, e que apresentassem suas sínteses por meio de materiais biológicos, os tipos de remediação promovidos, bem como os riscos da exposição dos seres humanos e do meio ambiente a elas. No referido levantamento, constatou-se que a nanotecnologia é um campo em desenvolvimento que aspira um protagonismo no combate à poluição, com grande oportunidade de estudos e aplicações inovadoras. As plantas são as fontes de materiais biológicos mais recomendados nos ensaios relacionados ao tema, com vantagens significativas em relação a outros organismos indicadores de processos de remediação.

Palavras-chave: biorremediação; biossíntese de nanopartículas; nanotecnologia; poluição; tratamento ambiental.

ABSTRACT

The preservation and availability of pollution-free water is one of today's environmental concerns, emphasized in the purpose of the planet's sustainable development. Nanotechnology is a relatively new resource that can be a great ally in combating water pollution. This undergraduate conclusion work sought to produce a review that listed some of the nanoparticles already used successfully in the fight against water pollution, and that presented their syntheses using biological materials, the types of remediation promoted, as well as the risks of exposure to human beings and the environment to them. In the aforementioned survey, it was found that nanotechnology is a developing field that aspires to take a leading role in the fight against pollution, with great opportunity for innovative studies and applications. Plants are the most recommended sources of biological materials in tests related to the topic, with significant advantages in relation to other organisms that indicate remediation processes.

Keywords: bioremediation; environmental treatment; nanoparticles biosynthesis; nanotechnology; pollution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fulereo C-60 (Ilustração criada por computador)	16
Figura 2 – Nanoestrutura do ferro zero-valente	18
Figura 3 – Arquitetura dos dendrímeros	19
Figura 4 – Diferentes formas de Nanotubos de Carbono	21
Figura 5 – Nanotubos de Carbono alinhados	22
Figura 6 – Tecnologias <i>in situ</i> utilizadas no combate à poluição do lençol freático e do solo	30
Figura 7 – Ciclo de vida das nanopartículas e possibilidade de contato humano e ambiental	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais tipos de nanomateriais, seus métodos de síntese e exemplos	17
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CD	Ciclodextrina
CNT	Nanotubo de Carbono
FT-IR	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier
GO	Óxido de Grafeno
IBN	Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia
MDR	Resistência bacteriana a múltiplas drogas
MWNT	Nanotubo de Parede Múltipla
nZVI	Nanopartícula de ferro zero-valente
NNI	Iniciativa Nacional de Nanotecnologia dos EUA
NP	Nanopartícula
ONU	Organização das Nações Unidas
PAE	Planos de Ação de Emergência
PANI	Polianilina
PDT	Terapia Fotodinâmica
PTT	Terapia Fototérmica
PNSB	Política Nacional de Segurança em Barragens
PSB	Planos de Segurança de Barragens
SEM	Microscopia eletrônica de varredura
SERS	Dispersão Raman amplificada por superfície
SPR	Ressonância plasmônica de superfície
SWNT	Nanotubo de Parede Simples
TEM	Microscopia eletrônica de transmissão
ZnNPs	Nanopartículas de zinco
ZVI	Ferro zero-valente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3	METODOLOGIA	14
4	RESULTADOS: REVISÃO	15
4.1	NANOTECNOLOGIA	15
4.2	NANOPARTÍCULAS	16
4.3	BIOSSÍNTESES DE NANOPARTÍCULAS	23
4.4	NANORREMEDIAÇÃO	28
4.5	AVALIAÇÃO DE RISCOS.....	30
5	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água livre de contaminação tem sido uma grande questão mundial. Embora a maior parte da superfície terrestre seja composta por água, sabe-se que a disponibilidade desta para o consumo direto de plantas e animais é bem restrita e finita. Diferentemente dos mares e oceanos que representam aproximadamente 97% da água do planeta, os rios, lagos e os lençóis freáticos, juntamente com a água da chuva, disponibilizam a chamada água doce de consumo direto, ou seja, água com baixo teor de sais minerais usada para o consumo e que serve de habitat para animais e vegetais (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019).

O crescimento populacional e os meios de produção demandam uma alta exploração dos recursos hídricos, utilizados em grande parte na geração de energia, na produção de alimentos na agricultura e nas indústrias farmacêuticas, metalúrgicas, de mineração, têxtil, entre inúmeras outras. Além dessas questões, o agravante da poluição torna o problema ainda mais acentuado ao passo que as águas subterrâneas e superficiais utilizadas para consumo direto – que já têm uma disponibilidade reduzida – recebem uma ampla gama de poluentes (CHONG *et al.*, 2010). Os principais contaminantes relatados por Li *et al.* (2010) são metais pesados, compostos inorgânicos, poluentes orgânicos e muitos outros compostos mais complexos.

Dois grandes exemplos a serem lembrados são os desastres ambientais ocorridos recentemente no Brasil. Em 2015, o rompimento da barragem de rejeitos em Mariana (MG) resultou em uma grande quantidade de material tóxico despejada nos rios da região, causando séria contaminação de suas águas. A presença de substâncias como as aminas contribuiu para a degradação da qualidade da água, afetando não apenas a vida aquática, mas também a saúde humana e a biodiversidade local (SILVA; FERREIRA; SCOTTI, 2015). Mais recentemente, em 2019, outra barragem de rejeitos – localizada em Brumadinho (MG) – rompeu. Os rejeitos atingiram o rio Paraopeba, causando a morte de animais e tornando a água imprópria para o consumo (SANTOS, 2019). Esses desastres foram causados principalmente pela falta de compromisso ambiental da indústria de mineração.

Os fatos ocorridos no ano de 2015 em Mariana (MG) e no ano 2019 em Brumadinho (MG) foram de responsabilidade das empresas SAMARCO e VALE, respectivamente, e ocasionaram consequências sem precedentes não só para o local do desastre, mas também para os ambientes pertencentes às bacias hidrográficas dos diferentes estados em que os corpos d'água conectados percorrem seu caminho até o mar. Os danos causados ao meio ambiente e às populações atingidas são indeterminados, imprevisíveis e incalculáveis. De acordo com

Lopes (2016, p. 1) os dejetos derramados na cidade de Mariana, “ceifaram vidas humanas, contaminaram rios e destruíram florestas inteiras”.

O Estado brasileiro adota diversas medidas para assegurar a segurança das barragens e a preservação da água. A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), com o objetivo de garantir a observância de padrões rigorosos de segurança e, assim, proteger a vida humana, a saúde pública, o meio ambiente e o patrimônio. A PNSB impõe aos empreendedores a responsabilidade pela segurança das barragens, o que inclui a elaboração de Planos de Segurança de Barragens (PSB) e Planos de Ação de Emergência (PAE) para barragens de alto risco ou com alto potencial de dano. Além disso, a lei designa os órgãos fiscalizadores competentes para monitorar e fiscalizar a implementação dessas medidas, assegurando a integridade das estruturas e a proteção dos recursos hídricos (BRASIL, 2010).

A contaminação das águas é um problema a nível mundial, que afeta diretamente o desenvolvimento sustentável do planeta. A importância da água é evidenciada em dois dos dezessete objetivos de desenvolvimento sustentável estipulados por uma comissão designada pela Organização das Nações Unidas (ONU) e aprovados em setembro de 2015 (ONU, 2015). São eles: Água Potável e Saneamento Básico, e Vida na água. Sua importância também se evidencia através das questões de saúde pública e de preservação do meio ambiente incluídas na proposta da Agenda 2030.

Pesquisadores de todo o mundo têm dedicado esforços para desenvolver alternativas ecologicamente aceitáveis no que se refere ao tema da limpeza ambiental. Rizwan *et al.* (2014) resumiram brevemente os principais tipos de nanomateriais, utilizados na biorremediação de resíduos e materiais tóxicos. Já Yadav *et al.* (2017), por exemplo, especularam sobre a potencialidade da biossíntese de nanopartículas para a limpeza ambiental.

A nanotecnologia teve como precursor o cientista Richard P. Feynman (1959), que ainda não utilizava o termo nanotecnologia em seu trabalho, mas havia desenvolvido uma pesquisa em escala nanométrica. No Japão, quando o termo foi estreado pelo cientista e professor japonês da Universidade de Tóquio, Norio Taniguchi, em 1974, a nanotecnologia foi descrita como um conjunto de tecnologias capazes de construir materiais na escala de 1 nanômetro (FERREIRA; RANGEL, 2009). O tema ganhou ampla visibilidade a partir dos anos 80 com o avanço da microscopia. Esta trouxe a possibilidade de análise do trabalho em nano escala através do microscópio de corrente de tunelamento criado pelos inventores Gerd Binnig e Heinrich Rohrer em 1981. Tal microscópio permitia a visualização de superfícies no nível atômico. Esse feito rendeu para eles o Nobel de Física de 1986 (LOPEZ-GASSO, 2018).

Nas últimas duas décadas, nanomateriais têm sido testados como alternativas aos materiais convencionais devido à sua alta eficiência, boa relação custo-benefício e natureza ecológica (DASTJERDI; MONTAZER, 2010).

Nano partículas são definidas como partículas de 1 a 100 nm em, no mínimo, uma de suas dimensões. Materiais e partículas em nanoescala apresentam uma grande relação Superfície/Volume. Em decorrência disso, eles exibem propriedades mecânicas, ópticas, magnéticas e químicas distintas dos mesmos materiais ou partículas quando em escala macroscópica. Essa característica traz vantagens no que concerne à economia e à eficiência em comparação aos métodos de remediação convencionais, os métodos físicos, químicos e biológicos (RAJ KUMAR; GOPINATH, 2016).

Em busca de novas tecnologias em relação ao tratamento, monitoramento e à remediação da água, este trabalho tem por objetivo revisar a literatura científica e discutir alguns métodos nanotecnológicos, bem como as vantagens e desvantagens de sua aplicação, visando estudos futuros em de remediação de águas em grande escala.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi elaborar uma revisão de dados de pesquisas dos últimos 20 anos acerca da aplicação de estratégias nanotecnológicas, em especial de nanobiorremediação, na recuperação de ambientes poluídos, particularmente de águas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar uma visão geral de agentes poluidores, em especial, de águas, e apresentar a importância da recuperação ambiental;
- Apresentar uma definição e descrição histórica sobre nanotecnologias, nanopartículas e nanobiorremediação;
- Descrever a biossíntese de nanopartículas com finalidade de biorremediação;
- Descrever exemplos de sucesso de práticas de nanobiorremediação;
- Apresentar os possíveis riscos do uso da nanobiorremediação.

3 METODOLOGIA

Foram pesquisados artigos publicados nos últimos 20 anos em revistas indexadas nas bases de dados disponíveis em catálogos como “Scopus”, “Scielo”, “Dedalus-USP”, “Google/Science”, “Medline”, “Meta miner” e “Web of Science”, além dos periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), utilizando os unitermos “nanorremediação”, “biorremediação”, “biossíntese de nanopartículas”, “nanotecnologia”, “poluição ambiental”.

4 RESULTADOS: REVISÃO

4.1 NANOTECNOLOGIA

A ascensão da nanotecnologia como uma tendência dominante na ciência e na tecnologia do século XXI é impulsionada pelo aumento dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D), especialmente após a formação da *National Nanotechnology Initiative* (NNI) – Iniciativa Nacional de Nanotecnologia, nos Estados Unidos. O aumento dos investimentos tem levado a uma proliferação de programas de P&D em nanotecnologia em todo o mundo, incluindo países como China, União Europeia, Japão e Coreia. Os EUA lideram em número de empresas ativas com foco em P&D na área de nanotecnologia, seguidos por Alemanha e França. Já a Federação Russa destaca-se por maiores gastos em nanotecnologia em relação ao total de gastos em P&D. Isso se reflete nos investimentos governamentais e acadêmicos. Os EUA, por exemplo, alocaram mais de 1,5 bilhão de dólares para a NNI em 2016. Esses avanços trazem desafios e oportunidades para países em desenvolvimento enquanto a comunidade científica global se torna mais interconectada com novos líderes emergindo no cenário científico global (CHINCHILLA-RODRÍGUEZ; OCAÑA-ROSA; VARGAS-QUESADA, 2016).

A nanotecnologia é a tecnologia usada na síntese e na aplicação de partículas e materiais em escala nanométrica (10^{-9} m), podendo ser definida como

pesquisa e desenvolvimento de tecnologias em nível atômico, molecular ou macromolecular usando dimensões de escala entre 1 e 100 nm em ao menos uma de suas dimensões, bem como a criação e o uso de estruturas, dispositivos e sistemas que possuam propriedades e funções devido ao seu reduzido tamanho. Além da capacidade de controlar e manipular a matéria em uma escala atômica (US EPA, 2007, p. 5).

O diferencial dos materiais quando estão em escala nanométrica se dá através das características inerentes ao tamanho, como por exemplo: alta relação entre superfície de contato e o volume, alta reatividade, adsorção forte e dissolução mais acelerada em comparação com os mesmos materiais em dimensões maiores (RAJ; GOPINATH, 2016). Além disso, as dimensões suficientemente pequenas de uma partícula em nanoescala conferem uma característica visível exclusiva através do confinamento de seus elétrons, produzindo assim efeitos quânticos (YADAV *et al.*, 2017). Um exemplo de efeito quântico é o TiO_2 , que tem sido usado como pigmento branco na alta pintura há muito tempo. Em contrapartida, o mesmo material, quando em escala nanométrica, é transparente à luz visível (comprimento de onda 400-800 nm) (MUELLER; NOWACK, 2010).

A Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia (IBN), criada em 2013, foi estabelecida como o principal programa estratégico para incentivo da Nanotecnologia no Brasil pela Portaria nº 3.469 em 26 de julho de 2019. Estimular o desenvolvimento conjunto de novas tecnologias e a transferência de conhecimentos e tecnologias associados à nanotecnologia, da academia para os setores público e privado, com vistas à geração de riqueza, emprego e crescimento nacional, está entre os principais objetivos da IBN (Brasil, 2019).

4.2 NANOPARTÍCULAS

Segundo Yadav *et al.* (2017),

as nanopartículas estão amplamente divididas em dois grupos: orgânicas e inorgânicas. As orgânicas incluem nanopartículas de carvão (fulerenos) (Figura 1), enquanto as inorgânicas incluem nanopartículas magnéticas de metais nobres (por exemplo ouro e prata) e nanopartículas de semicondutores (por exemplo, dióxido de titânio e óxido de zinco).

Já Ruffini-Castiglione e Cremonini (2009) identificaram três tipos de nanopartículas, são elas: naturais (por exemplo, sedimentos vulcânicos e compostos minerais), incidental (resultante da atividade antropogênica, por exemplo, do escape de diesel, da combustão do carvão, fumos de soldadura) e de engenharia, sendo esta última, referente aos diversos tipos de manipulação e otimização de nanopartículas.

Figura 1 – Fulereo C-60 (Ilustração criada por computador).



Fonte: US EPA (2007)

A síntese dos nanomateriais e das nanopartículas ocorre a partir de diversos métodos e por diferentes matérias estando as principais sínteses, seus precedentes e resultados conhecidos dispostos na Tabela 1, logo abaixo. Estes seis principais grupos de nanomateriais/nanopartículas são aplicáveis na remediação de hidrocarbonetos, urânio e poluição por metais tóxicos em resíduos sólidos, lençóis freáticos e águas residuais (RIZWAN *et al.*, 2014).

Tabela 1 – Principais tipos de nanomateriais, seus métodos de síntese e exemplos

Nanomateriais	Métodos de síntese	Exemplos
Nanopartículas metálicas	Fotoquímico	Pt, Rh, Pd, Ir, Ag, Au, Cu, Co, Ni, FeNi, Cu ₃ Au, CoNi, CdTe, CdSe, ZnS
	Eletroquímico	
	Bioquímico	
	Termoquímico	
Nanomateriais à base de carbono	Arco-descarga	Nanotubos cilíndricos (SWNT, MWNT), fulerenos
	Ablação a laser	
	Deposição de vapor químico	
Nanopartículas de óxidos metálicos	Hidrotérmico	ZnO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , MgO, BaCO ₃ , BaSO ₄ , TiO ₂
	Solvotérmico	
	Sol-gel	
	Método de micelas reversas	
Nanomateriais poliméricos	Deposição eletroquímica	Nanofios de polipirrol, polianilina, poli (3,4-etilenodioxitiofeno), dendrímeros de PAMAM
	Eletroquímica Polimerização	
Nanocompósitos	Métodos inovadores	Nanocompósitos de óxido de polietileno e polietilenamina; CNTs; compósitos epóxi (compósitos de polímeros de hidrocarbonetos, compósitos poliméricos conjugados), CNTs com policarbonatos, fluoropolímeros, polietilenoglicol, poliamidas de poliéster e assim por diante
Bionanomateriais	Biológico	Vírus, plasmídeos e NP de proteínas

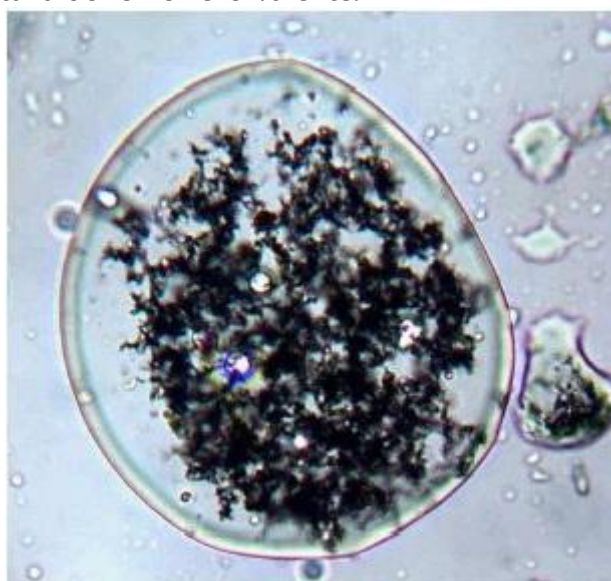
Fonte: RIZWAN *et al.*, 2014.

Legenda: SWMT (Nanotubo de Parede Simples), MWNT (Nanotubo de Parede Múltipla), CNT (nanotubo de carbono).

As nanopartículas metálicas, como por exemplo a partícula de ferro zero-valente (ZVI) em nanoescala (nZVI), removem espécies móveis e altamente tóxicas de arsênio (As) de lençóis freáticos (KANEL *et al.*, 2005). O ZVI é capaz de remover arsênio devido à sua capacidade de reação com compostos desse elemento, resultando na formação de produtos menos tóxicos ou insolúveis que podem ser removidos do meio. A reação entre o ZVI e o As pode envolver processos de adsorção, oxidação e/ou redução, levando à imobilização do arsênio e à sua

remoção da água. Além disso, o tamanho reduzido das partículas de ZVI na forma nanométrica (nZVI) aumenta a área de superfície disponível para interações com o arsênio, melhorando a eficiência do processo de remoção. O uso do ferro zero-valente (ZVI) na remediação de águas subterrâneas contaminadas ocorreu em um estudo realizado em Bangladesh e na região de West Bengal, na Índia. Nesse estudo, o nZVI foi empregado com sucesso para remover arsênio de amostras de água subterrânea contaminadas, alcançando eficiência de remoção de todo o arsênio da amostra (KANEL; GRENÈCHE; CHOI, 2006). Abaixo, a Figura 2 exibe uma imagem que mostra uma nanoestrutura de ferro zero-valente.

Figura 2 – Nanoestrutura do ferro zero-valente.



Fonte: US EPA (2007).

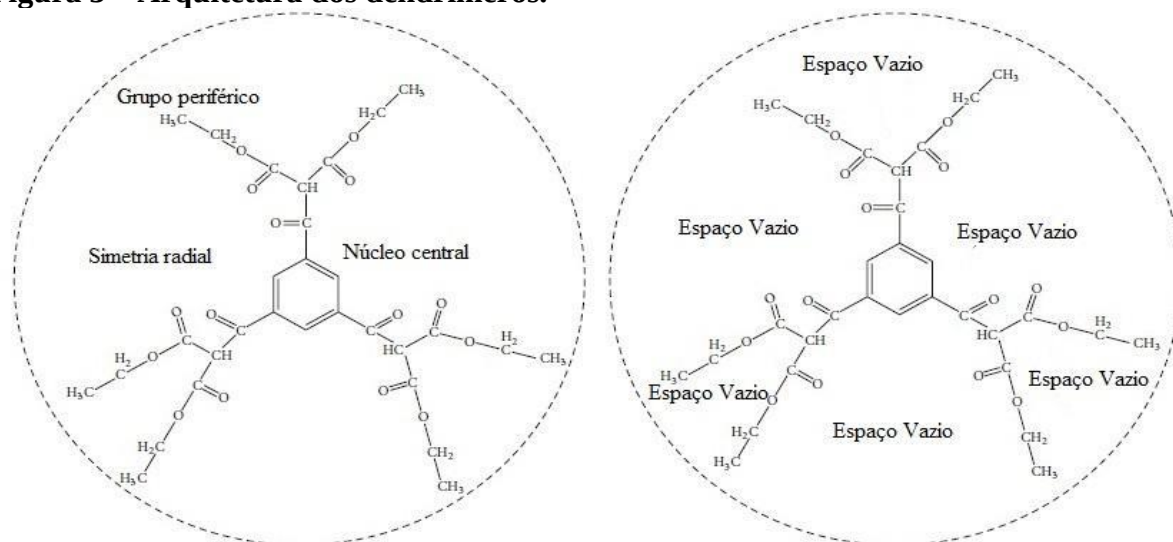
As nanopartículas poliméricas têm ampla gama de aplicação e podem ser associadas a outros nanomateriais para alcançar melhor eficiência na sua aplicação (SOUTO; SEVERINO; SANTANA, 2012).

Os dendrímeros, um dos membros do campo polimérico, por sua natureza estrutural, apresentam muitos espaços vazios que possibilitam sua interação com outras substâncias. Eles são bastante utilizados para melhorar a atividade catalítica no tratamento de água devido sua maior área de superfície, maior reatividade e baixa toxicidade (UNDRE *et al.*, 2013) (Figura 3).

Os dendrímeros têm se destacado em sua aplicação no sistema de entrega de medicamentos conhecido como *drug delivery*. Sua estrutura altamente ramificada permite a encapsulação eficiente de fármacos em seus ramos vazios, proporcionando a proteção dos medicamentos durante seu transporte pelo organismo. Além disso, sua superfície funcionalizada possibilita modificações químicas com grupos químicos específicos, de modo

que se permite o direcionamento seletivo dos dendrímeros para os tecidos ou células-alvo. Essa capacidade de encapsulação e liberação controlada dos fármacos pode resultar em terapias mais eficazes, com menor toxicidade e redução de efeitos colaterais; tal capacidade tem importante aplicação na área biomédica (REINOLD, 2011).

Figura 3 – Arquitetura dos dendrímeros.



Fonte: Adaptado pelo autor (2019) a partir de Rizwan *et al.* (2014).

Em conjugados com filtros cerâmicos porosos de dióxido de titânio, os dendrímeros são impregnados nos poros, resultando em uma unidade simples de alta resistência mecânica e grande área de superfície utilizada na filtração de poluentes orgânicos na água (GUO *et al.*, 2012).

O site de notícias científicas *Sciencedaily* publicou um estudo da Universidade Rice em parceria com o Centro NEWT em que foi desenvolvido um tapete de polímero baseado em uma estratégia de “atrair, prender e destruir”. Esse tapete utiliza partículas de dióxido de titânio para capturar e degradar poluentes presentes na água, tornando-a segura para o consumo humano e ambientalmente sustentável. Além de ser altamente eficiente na remoção de contaminantes, o tapete é reutilizável, escalável e pode ser adaptado para tratar uma variedade de poluentes, oferecendo uma solução econômica e eficaz para o fornecimento de água limpa em todo o mundo (LEE *et al.*, 2018).

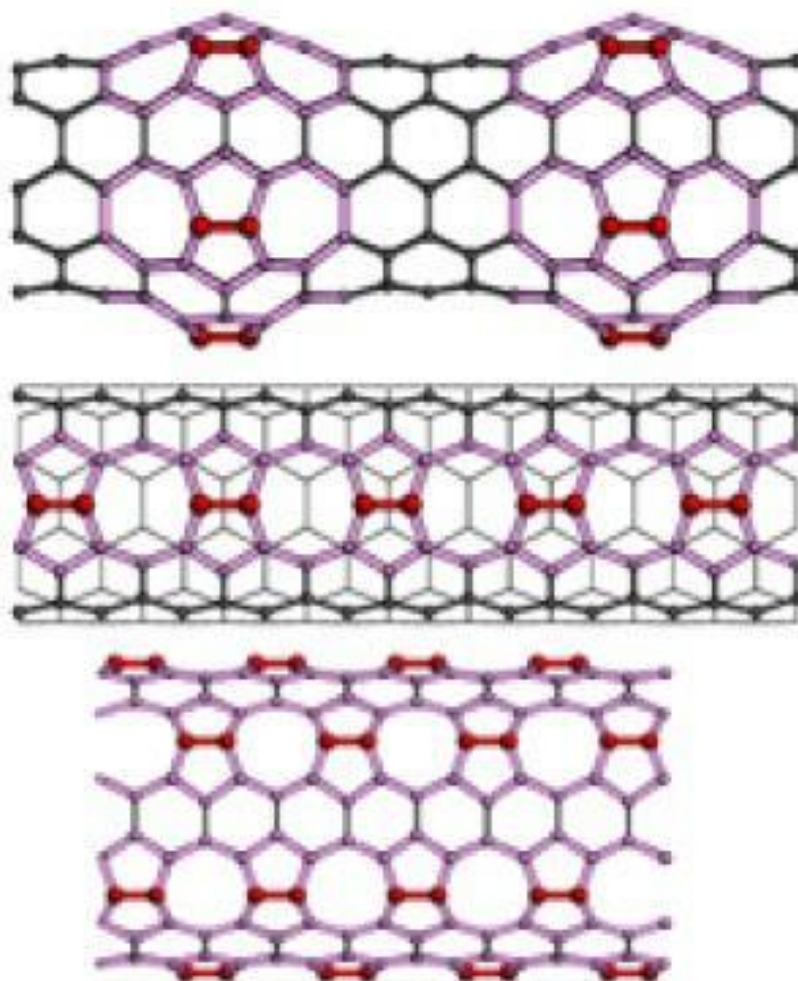
A versatilidade de nanomateriais à base de carbono faz com que eles possam atuar em diversas vertentes das aplicações ambientais, como filtros e adsorventes eficientes para o benzeno, evitando doenças provocadas por etilbenzeno e atuando na limpeza da poluição ambiental e na manutenção da água de alta qualidade (BINA *et al.*, 2011). A aplicação de nanomateriais à base de carbono, como nanotubos de carbono (CNTs) e óxido de grafeno (GO),

na despoluição de águas contaminadas com benzeno é um método promissor devido às suas propriedades únicas de adsorção. Esses nanomateriais possuem uma área de superfície extremamente alta e podem ser funcionalizados com diversos grupos químicos, como $-OH$ e $-COOH$, que aumentam a sua afinidade por compostos orgânicos, incluindo hidrocarbonetos aromáticos como o benzeno. A funcionalização melhora a dispersibilidade dos nanomateriais em água e otimiza as interações eletrostáticas e interações do tipo $\pi-\pi$ com as moléculas de benzeno, facilitando a sua captura e remoção da água contaminada. Além disso, a elevada área de superfície dos CNTs e do GO proporciona uma capacidade de adsorção muito maior em comparação com os adsorventes convencionais, permitindo uma remoção mais eficiente mesmo em baixas concentrações de contaminantes. Essa capacidade de adsorção superior aliada à possibilidade de modificação química dos nanomateriais torna-os soluções eficazes e versáteis para a purificação de água, destacando-os como alternativas avançadas na luta contra a poluição por benzeno e outros compostos orgânicos persistentes (SMITH; RODRIGUES, 2015).

Nanocompostos, como as ciclodextrinas (CDs), incorporados a nanotubos de carbono (CNT) (Figuras 4 e 5) também apresentam uma alta eficiência no combate à poluição orgânica e inorgânica da água. Na remoção de cobre, por exemplo, atingem-se 69,9% de eficiência mesmo em condições de pH abaixo de 2.1 (LI *et al.*, 2010).

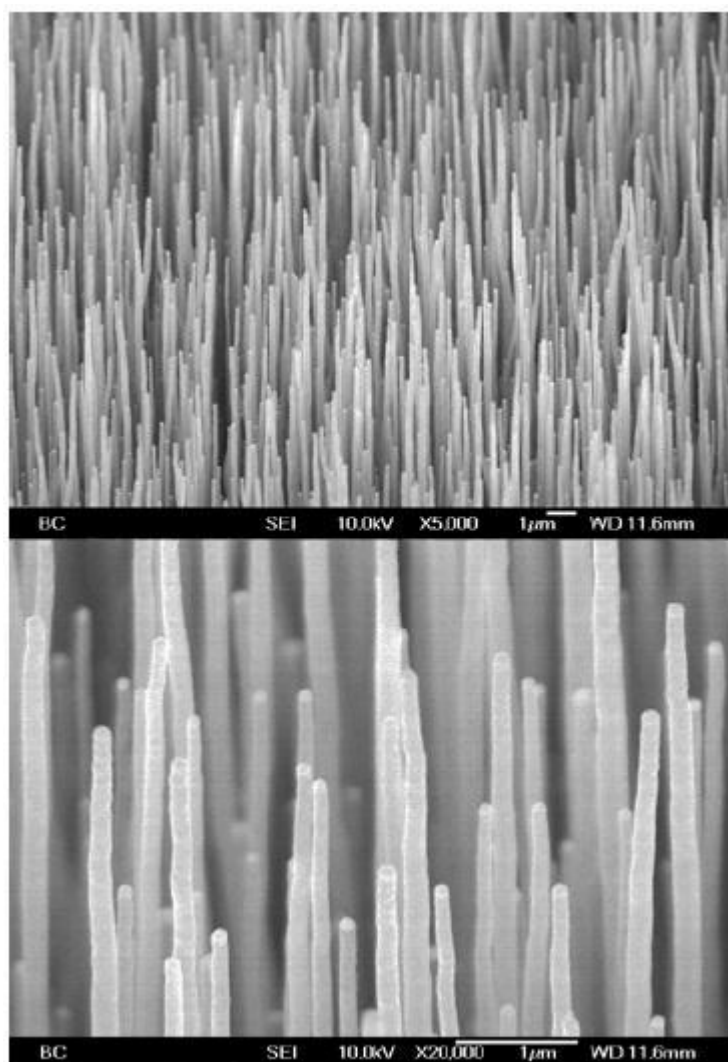
A aplicação de nanotubos de carbono (CNTs) funcionalizados com dendrímeros de poliamidoamina (PAMAM) tem demonstrado ser um método altamente eficaz para a remoção de íons de cobre (Cu^{2+}) de soluções aquosas. Em um estudo de 2017, os CNTs foram tratados com ácidos nítrico e sulfúrico para introduzir grupos carboxílicos ($-COOH$) em suas superfícies, os quais foram subsequentemente funcionalizados com dendrímeros PAMAM, resultando na criação de nanocompósitos de PAMAM/CNT. A caracterização desses nanomateriais, realizada através de técnicas como FT-IR, potencial zeta, SEM e TEM, confirmou a presença de grupos funcionais específicos e a integridade estrutural dos nanocompósitos. Os ensaios de adsorção revelaram uma capacidade excepcionalmente alta de remoção de íons de cobre, com os nanocompósitos PAMAM/CNT alcançando capacidades de adsorção de até 3333 mg/g para Cu^{2+} . Esses resultados destacam a eficiência dos CNTs funcionalizados como superabsorventes, proporcionando uma solução promissora e de alto desempenho para a purificação de águas contaminadas com metais pesados (HAYATI *et al.*, 2017).

Figura 4 – Diferentes formas de Nanotubos de Carbono.



Fonte: US EPA, 2007.

Figura 5 – Nanotubos de Carbono alinhados.



Fonte: US EPA (2007).

A biorremediação apresenta vantagens em relação aos demais tratamentos convencionais – tais como remoção física, remediação química e remediação térmica – no que se refere ao custo-benefício, à eficácia, à redução de resíduos químicos e biológicos, à seletividade de metais específicos, à regeneração de bioabsorventes, às possibilidades de recuperação de metais e à suplementação de nutrientes (KRATOCHVIL; VOLESKY, 1998). No entanto, é importante ressaltar que a maioria dos microrganismos selecionados para biorremediação é escolhida por sua capacidade de tolerar ou resistir a substâncias tóxicas, o que limita sua aplicabilidade em locais contaminados com substâncias altamente tóxicas. Por outro lado, no campo da nanobiorremediação, as nanopartículas oferecem uma solução promissora para remediar ambientes hostis com alta toxicidade, além de fornecer substrato para acelerar a atividade de microrganismos e otimizar o processo de remediação do ambiente.

As nanopartículas, por sua vez, são capazes de remediar locais hostis com alta toxicidade e ainda fornecer substrato para acelerar a atividade de microrganismos e otimizar o processo de remediação do ambiente (DAVIS; PRAKASH; THAMARAISELVI, 2017). Desse modo, a nanobiorremediação é uma técnica que combina técnicas de biorremediação com nanotecnologia para remover de forma eficaz e sustentável contaminantes ambientais, como metais pesados e compostos orgânicos. Nesse processo, as nanopartículas são utilizadas para aumentar a eficiência da degradação de poluentes por organismos vivos, como plantas e microrganismos. Um exemplo prático é a utilização de nanopartículas de ferro na nanobiorremediação de ambientes contaminados por hidrocarbonetos apresentando-se como uma estratégia promissora e eficaz. Estudos demonstraram que as nanopartículas de ferro podem estimular a produção de biosurfactantes em microrganismos, aumentando a biodisponibilidade de compostos hidrofóbicos para os microrganismos degradadores. Além disso, a presença do ferro é essencial para a síntese de biosurfactantes em diversos microrganismos, tornando-o um cofator crucial para a eficiência do processo de biorremediação. A capacidade das nanopartículas de ferro para melhorar a solubilidade de hidrocarbonetos e facilitar a degradação microbiana dos contaminantes ressalta seu potencial como uma ferramenta inovadora e sustentável para a remediação de ambientes altamente tóxicos (KUMARI; SINGH, 2016).

4.3 BIOSSÍNTESES DE NANOPARTÍCULAS

Como mencionado na Tabela 1, são várias as possibilidades de síntese de nanomateriais por via bioquímica, fotoquímica, eletroquímica, termoquímica, entre outras.

Nas sínteses realizadas por métodos biológicos, o baixo custo, a dispensa do uso de produtos químicos perigosos e a baixa toxicidade de subprodutos conferem vantagens (KONISHI *et al.*, 2006).

Em busca de tecnologias ecologicamente sustentáveis e explorando a biossíntese de nanopartículas, Davis, Prakash e Thamaraiselvi (2017), empenharam-se com estudos sobre cinco partículas metálicas sintetizadas em nanoescala, com grande potencial de remediação e degradação de poluentes ambientais. A constatação de que nanopartículas de zinco (Zn), prata (Ag), ouro (Au), ferro (Fe) e cobre (Cu) podem ser sintetizadas a partir de materiais biológicos, como extratos vegetais, bactérias, fungos e algas, e de que o tema tem sido amplamente pesquisado e considerado mais bem sucedido em comparação com outros métodos de síntese, fez com que eles tabulassem as principais biossínteses utilizando entidades biológicas. Bactérias, fungos e vírus têm demonstrado a capacidade de sintetizar nanopartículas de zinco;

há estudos destacando a eficácia desses microrganismos nesse processo, entre eles estão as *Pseudomonas*. No caso da prata, microrganismos como *Escherichia coli* têm sido amplamente estudados por sua habilidade em reduzir íons de prata e formar nanopartículas com propriedades específicas. A síntese de nanopartículas de ouro por microrganismos, incluindo fungos como os *Fusarium oxysporum*, tem sido explorada devido às propriedades únicas desses materiais. No que se refere ao ferro, por exemplo, bactérias como *Shewanella oneidensis* têm sido investigadas por sua capacidade de sintetizar nanopartículas com propriedades magnéticas distintas (NARAYANAN; SAKTHIVEL, 2010).

As nanopartículas de zinco (ZnNPs) têm sido amplamente estudadas na última década, sendo protagonistas dos mais variados campos da nanobiotecnologia. Na questão ambiental, recebem destaque ao atuarem remediação de águas contaminadas por arsênio (SINGH *et al.*, 2013). A biorremediação do arsênio pelo bionanocompósito ZnO:CeO₂:nanocelulose:PANI potencializada devido à presença das nanopartículas de ZnO e CeO₂, as quais são conhecidas por sua alta capacidade de adsorção de metais pesados. A nanocelulose, por sua vez, atua como uma matriz sustentável que proporciona uma superfície de grande área para a adsorção eficiente de arsênio. A polianilina, como componente da matriz polimérica, pode contribuir para a estabilidade do compósito e potencializar as propriedades adsorventes das nanopartículas. Essa combinação de materiais resulta em um adsorvente altamente eficaz na remoção do arsênio de soluções aquosas, o que o torna uma opção promissora para a descontaminação de águas contaminadas com esse metaloide (NATH *et al.*, 2016).

Com o avanço nanobiotecnológico, as nanopartículas de prata (AgNPs) passaram a ser desenvolvidas de forma benigna ao meio ambiente; suas atividades antimicrobianas permitem muitas aplicações, inclusive na área médica, revestindo vasos coletores de sangue (GEOPRINCY *et al.*, 2011). A síntese de nanopartículas de prata pode ocorrer por meio de métodos físicos ou químicos. No método físico, as nanopartículas são produzidas por evaporação-condensação em um forno de tubo ou por ablação a laser de materiais metálicos em uma solução. O uso de um aquecedor cerâmico pequeno permite a produção de nanopartículas em alta concentração devido ao gradiente de temperatura acentuado. No método químico, os íons metálicos em solução são reduzidos em condições favoráveis, resultando na formação de pequenos aglomerados metálicos. A síntese por ablação a laser oferece a vantagem de produzir coloides puros sem a necessidade de reagentes químicos na solução. As nanopartículas de prata (AgNPs) têm sido amplamente utilizadas como agentes antibacterianos na indústria de saúde, no armazenamento de alimentos, em revestimentos têxteis, e em outras diversas áreas de aplicação. Como agentes antibacterianos, as AgNPs são empregadas em uma ampla gama de

aplicações, desde a desinfecção de dispositivos médicos e eletrodomésticos até o tratamento de água. Aliás, elas foram incorporadas em tecidos têxteis, manifestando alta atividade antibacteriana. Suas propriedades eletroquímicas também as tornam úteis em sensores nanoscópicos, oferecendo tempos de resposta mais rápidos e limites de detecção mais baixos. As atividades catalíticas das nanopartículas de prata diferem das propriedades químicas dos materiais em massa; elas são utilizadas em reações como o clareamento de corantes orgânicos e a catalisação da reação de quimioluminescência. Além disso, suas propriedades ópticas, como a ressonância de plásmon de superfície, têm aplicações potenciais em armazenamento óptico de dados, etiquetas biológicas e displays eletroluminescentes (EL-NOUR *et al.*, 2010).

Nanopartículas de ouro (AuNPs) são altamente reativas, elas oscilam na superfície do plasma para utilização em rotulagem, imagem e sensoriamento; e são biocompatíveis, com potencial para uso em diagnose de doenças e terapias (DAVIS; PRAKASH; THAMARAISELVI, 2017). A síntese de nanopartículas de AuNPs é um campo de crescente interesse devido às suas propriedades únicas e à sua ampla aplicação em várias áreas. Neste artigo, revisam-se os principais métodos utilizados na preparação de AuNPs, o que inclui os métodos físicos, químicos e biológicos. Nos métodos físicos, tais como a irradiação gama, a irradiação por micro-ondas, o método sonoquímico e a ablação a laser, a formação das AuNPs ocorre através de processos físicos controlados. No que se refere aos métodos químicos, ocorrem reações químicas em meio aquoso e utilizam-se agentes redutores, tais como o método de Turkevich, que é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e a seu controle de tamanho das nanopartículas produzidas. Além disso, a síntese biológica, também conhecida como biossíntese, utiliza recursos biológicos como plantas, bactérias e fungos para reduzir e estabilizar as AuNPs, promovendo assim um método mais sustentável e ecológico. As AuNPs são utilizadas em diversas aplicações para diagnóstico de doenças e terapias. Na terapia fotodinâmica (PDT), as AuNPs funcionam como agentes sensibilizadores de luz para induzir a morte de células tumorais por apoptose ou necrose. Já na terapia fototérmica (PTT), as AuNPs absorvem luz e geram calor, promovendo a destruição de tumores malignos. Além disso, as AuNPs são aplicadas como agentes de contraste em imagens de raios-X, devido à sua alta absorção de raios-X e estabilidade coloidal, facilitando o diagnóstico de doenças. Na entrega de medicamentos, as AuNPs servem como eficientes nanocarregadores, transportando uma variedade de fármacos, desde proteínas até agentes quimioterápicos, para locais específicos do corpo. Por fim, as AuNPs são amplamente empregadas em sensores químicos e biológicos para detectar diferentes substâncias, como íons metálicos, proteínas e toxinas, por meio de diversas estratégias sensoriais, incluindo colorimétricas, estratégias baseadas em fluorescência, elétricas

e eletroquímicas, ressonância plasmônica de superfície (SPR) e dispersão Raman amplificada por superfície (SERS). Essas aplicações demonstram o potencial das nanopartículas de ouro para contribuir para o diagnóstico e tratamento de doenças de maneira eficaz e precisa (ELAHI; KAMALI; BAGHERSAD, 2018).

Nanopartículas de metais nobres, como prata (Ag) e ouro (Au), além das enormes aplicações em diversas áreas, têm sido aplicadas na área ambiental como agentes da degradação de corantes orgânicos; da mesma forma, as nanopartículas de cobre (CuNPs), também podem ser usadas nesta degradação com bons resultados. As propriedades antimicrobianas no cobre são potencializadas quando estão em dimensões nanométricas, de forma que as nanopartículas de cobre (CuNPs) funcionam como agentes antimicrobianos no tratamento de água (DAVIS; PRAKASH; THAMARAISELVI, 2017). Nanopartículas de óxido de cobre (CuONPs) emergem como uma alternativa promissora na degradação fotocatalítica de corantes orgânicos em aplicações ambientais. Em um estudo de 2016, investigou-se a eficácia das nanopartículas de CuO na degradação do corante Acid Black 210 (AB-210) sob irradiação solar. A metodologia envolveu a dispersão das nanopartículas em água destilada, seguida pela adição da solução de AB-210 e exposição à luz solar. Os resultados espectrofotométricos indicaram que houve uma redução significativa na concentração de AB-210 ao longo do tempo de exposição à luz do Sol, demonstrando a capacidade das nanopartículas de CuO em catalisar a degradação do corante sob condições solares simuladas. Esse estudo ressaltou o potencial das nanopartículas de CuO como catalisadores eficazes para a remoção de corantes orgânicos em efluentes industriais, apresentando um método sustentável e economicamente viável para a remediação ambiental (IJAZ *et al.*, 2016).

No campo da nanotecnologia, as nanopartículas de ferro (FeNPs) são consideradas as pioneiras quando o assunto é limpeza ambiental (TRATNYEK; JOHNSON, 2006). Na remediação de solos contaminados ou águas subterrâneas, as nanopartículas de ferro tanto podem ser utilizadas como solventes atuando na adsorção e na imobilização de poluentes, como também podem atuar como doadoras de elétrons quebrando ou convertendo poluentes em um menos tóxico ou de forma móvel (CUNDY *et al.*, 2008). A tecnologia baseada em ferro tem emergido como uma estratégia promissora para a remoção de arsênio de águas subterrâneas e potáveis, especialmente em regiões como Bangladesh e Bengala Ocidental, onde milhões de pessoas estão expostas a concentrações elevadas de arsênio na água potável. Essas tecnologias, predominantemente à base de ferro, aproveitam a forte afinidade do arsênio com os óxidos de ferro, seja por processos de adsorção direta ou coprecipitação. Estudos destacam a capacidade dos óxidos de ferro em adsorver o arsênio, mesmo em baixas concentrações, e destacam o papel

crucial desses materiais na remoção de arsênio em sistemas de tratamento. Esses métodos demonstraram taxas de remoção superiores a 90%, mesmo em concentrações realistas de arsênio na água. Além disso, a pesquisa tem explorado o uso de materiais de baixo custo, como areia revestida com ferro, limagem de ferro e escórias de forno, para desenvolver filtros de ponto de uso acessíveis e eficazes na remoção de arsênio. Embora ainda em estágio inicial de desenvolvimento, essas tecnologias mostram um potencial significativo para a remoção eficaz do arsênio de volumes consideráveis de água contaminada, representando um método promissor para a limpeza ambiental (CUNDY; HOPKINSON; WHITBY, 2008).

Descobriu-se que fungos e bactérias, quando comparados com plantas, requerem um tempo de incubação mais longo para a redução de íons metálicos solúveis em água; portanto, em comparação com bactérias e fungos, as plantas são melhores candidatas para a síntese de nanopartículas (YADAV *et al.*, 2017). A síntese de nanopartículas realizada por plantas, também denominada síntese verde, é evidenciada devido ao processo de biossíntese de etapa única, ausência de substâncias tóxicas e ocorrência de agentes de cobertura naturais (GURUNATHAN *et al.*, 2009). A biossíntese de etapa única utiliza enzimas específicas para catalisar reações biológicas em uma única fase, eliminando etapas intermediárias. Enzimas programadas dentro de células microbianas promovem transformações oxidativas, redutivas e hidrolíticas de compostos orgânicos e inorgânicos. A engenharia genética introduz genes heterólogos e expressa-os *in vivo* para degradar compostos complexos, como hidrocarbonetos e metais pesados. Esse método melhora a eficiência dos processos biotecnológicos, reduz custos e impactos ambientais, e é aplicado na produção de biocombustíveis e na biorremediação, como demonstram os avanços significativos na biocatálise (OLIVEIRA; MANTOVANI, 2009). Em um estudo de 2013, cita-se o uso de biossíntese no combate à resistência bacteriana a múltiplas drogas (MDR); diante dessa situação crítica no que se refere à eficácia dos antibióticos tradicionais, impulsiona-se a busca por novas estratégias terapêuticas. A biossíntese de nanopartículas metálicas, especialmente as de prata, tem se destacado como uma solução promissora. Essas nanopartículas, sintetizadas por plantas e fungos, mostram atividades antimicrobianas eficazes contra patógenos resistentes como o *Staphylococcus aureus* resistente à meticilina (MRSA) e os *Enterococos* resistentes à vancomicina (VRE). As propriedades únicas das nanopartículas biossintetizadas permitem múltiplos mecanismos de ação contra bactérias, dificultando o desenvolvimento de novas resistências. Assim, a nanobiotecnologia verde oferece uma abordagem sustentável e eficaz para combater infecções resistentes a múltiplas drogas (RAI, 2013).

4.4 NANORREMEDIAÇÃO

A contaminação dos solos e a dos lençóis freáticos estão intimamente interligadas. Qualquer impacto que possivelmente ocorra em algum desses ambientes vai afetar diretamente na qualidade do outro. Por esse motivo, Mueller e Nowack (2010) resumiram as nanotecnologias de remediação usadas para lençóis freáticos e solo.

A contaminação do solo e do lençol freático por carcinógenos orgânicos ou metais tóxicos ocorre frequentemente em todo mundo. Aterros sanitários, barragem de dejetos oriundos de mineração e a agricultura são as principais fontes de contaminação dos lençóis freáticos por pesticidas e compostos halogenados (MULLER; NOWACK, 2010).

A remediação do solo e do lençol freático nos métodos convencionais (incluindo operações de lavagem e bombeamento do solo *ex situ* e *in situ*, tratamento térmico, oxidação química e uso de barreiras reativas com ferro) são demoradas e de alto custo e nem sempre são bem-sucedidas (HODSON, 2010). Nanopartículas de ferro zero valente (nZVI) têm se destacado como uma promissora ferramenta na remediação de solos contaminados, conforme o estudo realizado por Vieira (2014). A capacidade das nZVI para promover a degradação redutiva de contaminantes orgânicos – como foi demonstrado na pesquisa – evidencia sua eficácia na transformação de compostos tóxicos em produtos menos nocivos. Além disso, a alta reatividade e a área superficial das nanopartículas de ferro zero-valente possibilitam uma distribuição eficiente no solo, facilitando a interação com os contaminantes e promovendo processos de adsorção e de precipitação de metais pesados. Esses resultados corroboram a relevância das nZVI como uma alternativa sustentável e eficiente para a remediação de solos contaminados, contribuindo para a preservação ambiental e para a saúde pública (KARN; KUIKEN; OTTO, 2009) afirmam que os métodos de bombeamento e lavagem requerem 18 anos de operação em média, por sua vez, um tratamento com ferro zero-valente (ZVI) dura apenas o período de 1 a 2 anos.

De acordo com o estudo apresentado no IV Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, os métodos de remediação mais utilizados para enfrentar a contaminação de solos e águas subterrâneas envolvem a fotocatalise heterogênea e a adsorção (BORGES; GIORDANO FILHO; FÁTIMA DE SOUZA, 2019).

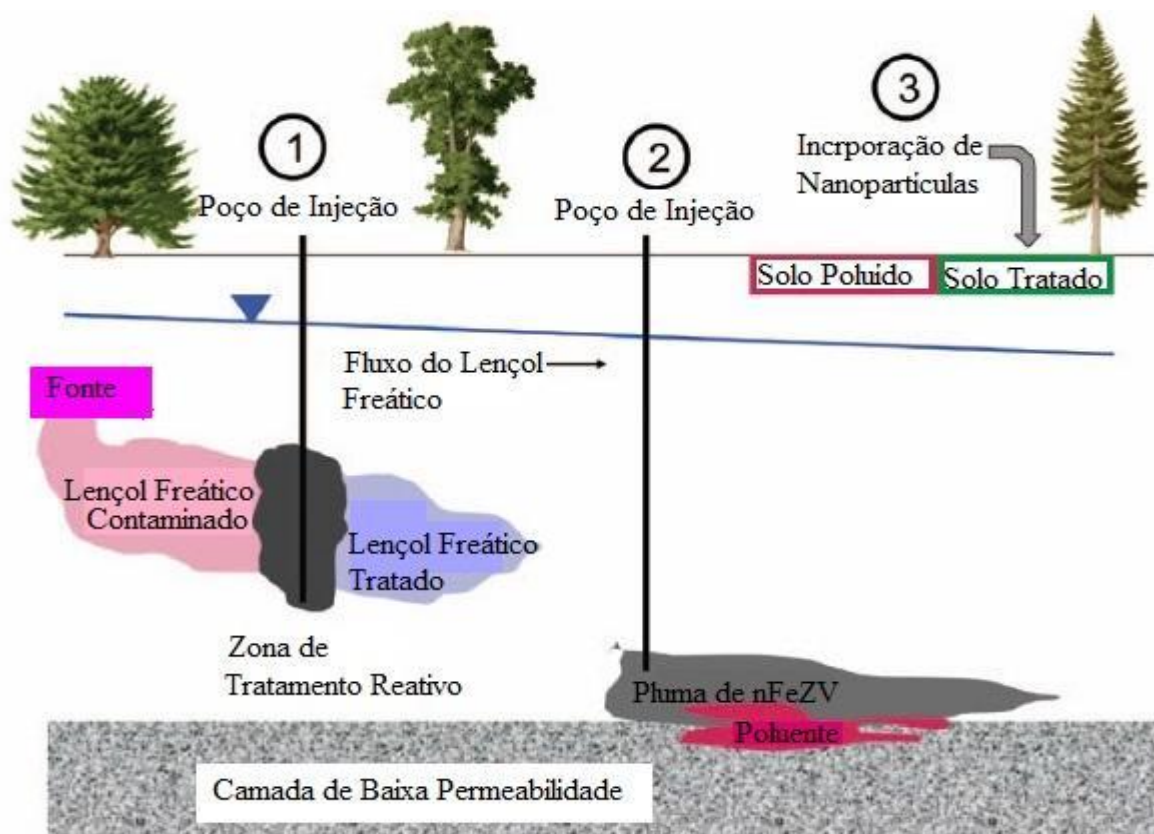
A fotocatalise utiliza o dióxido de Titânio (TiO₂) no combate a poluentes orgânicos. Já a adsorção faz uso de dendrímeros e óxido de ferro para remediar metais, compostos orgânicos e o arsênio (As). Óxidos de ferro têm um forte poder de adsorção para metais presentes no solo (SCHORR, 2007). Um ferro altamente óxido – reativo, é capaz de reduzir o

cromo hexavalente (Cr-VI) ao cromo trivalente (Cr-III), que não é solúvel e tem menos toxicidade do que o mutagênico, Cromo (VI) (EUROPEAN UNION, 2007). Nanomateriais à base de carbono, como dendrímeros e polímeros, também são explorados para a remoção de metais e orgânicos de solos e águas subterrâneas (MUELLER; NOWACK, 2009). Nanotubos de carbono emergem como um recurso promissor na remoção de contaminantes de águas residuais devido às suas propriedades únicas e à sua versatilidade. Sua excepcional área de contato superficial e capacidade de adsorção conferem-lhes uma eficiência notável na remoção de uma variedade de poluentes, incluindo metais pesados e compostos orgânicos recalcitrantes. Além disso, a estabilidade coloidal dos nanotubos de carbono pode ser otimizada por meio de modificações superficiais, aumentando ainda mais sua eficácia como adsorventes em soluções aquosas. Estudos demonstram que os nanotubos de carbono, tanto os de paredes simples quanto os de múltiplas, são capazes de remover eficientemente contaminantes como cromo hexavalente (Cr-VI) e corantes ácidos, contribuindo assim para a melhoria da qualidade da água e para o desenvolvimento de tecnologias avançadas de tratamento de efluentes industriais. Esses avanços destacam o potencial dos nanotubos de carbono como uma ferramenta valiosa na busca por soluções sustentáveis e eficazes para os desafios atuais de tratamento de águas residuais (CHIAVELLI *et al.*, 2019). E, por último, a reação redox utiliza nanopartículas de ferro zero-valente e peróxido de cálcio para remediar compostos orgânicos halogenados, metais, nitrato, arsenato e óleo (MUELLER; NOWACK, 2010).

Os métodos para remediação ambiental foram organizados por Tratnyek e Johnson (2006) e Hodson (2010) e classificados como adsorventes ou reativos, quanto ao tipo de interação, e como *in situ* ou *ex situ*, quanto ao local de aplicação.

As aplicações *in situ* para remediação de solo e lençóis freáticos mostram-se mais promissoras, pois, no geral, são mais rápidas; trata-se de criar uma zona reativa com partículas relativamente móveis *in situ* ou então uma pluma de nanopartículas reativas com a capacidade de migrar para os locais contaminados. As nanopartículas também podem ser trabalhadas diretamente na superfície do solo, sendo incorporadas nas práticas agrícolas convencionais (TRATNYEK; JOHNSON, 2006). Essas três formas de aplicação de nanopartículas *in situ* estão ilustradas na Figura 6, em que 1 representa uma zona reativa com partículas relativamente móveis; 2 representa uma pluma de nanopartículas reativas; e 3, a incorporação de nanopartículas.

Figura 6 – Tecnologias *in situ* utilizadas no combate à poluição do lençol freático e do solo.



Fonte: Adaptado pelo autor (2019) a partir de Mueller e Nowack (2010)

4.5 AVALIAÇÃO DE RISCOS

Dreher (2004) apontou incertezas sobre os riscos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente decorrentes da exposição a nanomateriais. Ainda hoje tais riscos permanecem no que se refere à exposição a nanomateriais; compreender o seu tamanho, forma, carga superficial e propriedades físico-químicas é fundamental para entender seu potencial de toxicidade (NASROLLAHZADEH; SAJADI, 2019). A variedade e as propriedades de cada nanomaterial fazem com que a avaliação dos riscos se torne muito complexa. Vale salientar que os nanomateriais têm grandes áreas de superfície por unidade de volume, além de novas propriedades eletrônicas em relação aos produtos químicos convencionais. Algumas das propriedades especiais que tornam os nanomateriais úteis também são propriedades que podem fazer com que alguns nanomateriais apresentem riscos aos seres humanos e ao meio ambiente (US EPA, 2007).

Tsuji *et al.* (2006) propuseram uma estrutura geral para avaliação de riscos de nanomateriais e identificaram algumas de suas características importantes como tamanho da partícula, estrutura, propriedades, revestimento e comportamento das partículas. Foi constatado

que diminuir o tamanho das partículas e aumentar a sua reatividade são propriedades que podem tornar uma substância mais tóxica. Os seguintes aspectos-chave da avaliação de riscos de uma substância são abordados: relevância e confiabilidade dos métodos e dados de pesquisas envolvendo-a, sua caracterização físico-química, sua exposição ao longo do ciclo de vida, seus efeitos e sua biocinética, sua modelagem e seus métodos *in silico*, a padronização e o desenvolvimento de protocolos, e a atualização regulatória que a mencionam (STEINHÄUSER; SAYRE, 2017).

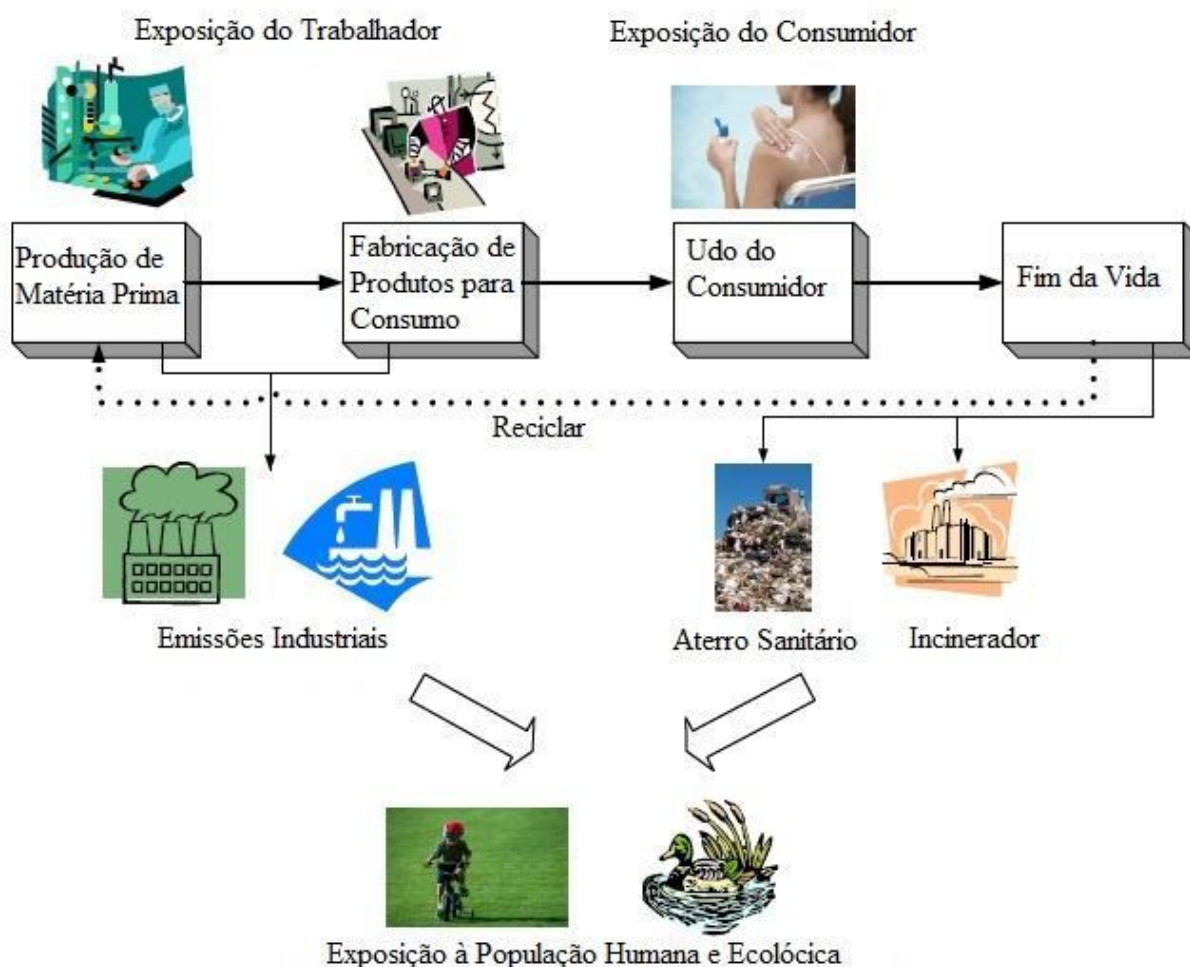
A toxicidade e a ecotoxicidade dos nanomateriais são especialmente importantes para todas as técnicas de nanorremediação, porque, na maioria das aplicações, eles são diretamente adicionados ao solo ou aos lençóis freáticos, e, assim, a exposição ambiental definitivamente ocorre (MUELLER; NOWACK, 2009).

Li *et al.* (2011) descobriram que nanopartículas de ferro (FeNPs) podem induzir a oxidação, danificar embriões de peixe e perturbar o equilíbrio do efeito antioxidante em peixes adultos. O risco associado a nanopartículas de ferro zero-valente (nZVI) não só depende da sua toxicidade, como também do tempo de exposição. Tratnyek e Johnson (2006) concluíram que a exposição ao nZVI será mínima devido à rápida aglomeração das partículas, à mobilidade limitada e à oxidação do óxido de ferro. Corroborando com Tratnyek e Johnson (2006), Phenrat *et al.* (2009) descobriram que nanopartículas de ferro zero-valente (nZVIs) com 11 meses de idade são menos tóxicas para a micróglia e neurônios de roedores do que as nanopartículas de ferro zero-valente (nZVIs) frescas, ao investigarem nZVIs envelhecidas e seus efeitos. Em um estudo mais recente, foi constatada uma toxicidade reprodutiva multigeracional induzida pelo nZVI no nematódeo *Caenorhabditis elegans*; isso pode implicar em potenciais riscos para biota com o uso do nZVI na remediação ambiental (YANG; CHEN; LIAO, 2016).

A produção anual estimada de materiais que contêm substâncias em nanoescala saltou de 1.000 toneladas em 2004 para 5.000 em 2010. Tem-se a perspectiva de que a marca de 100.000 toneladas seja atingida na próxima década. Esses números indicam a inevitável exposição humana e ambiental aos nanomateriais já presentes em cerâmicas, catalisadores, filmes e ligas metálicas, além do uso na indústria de cosméticos, nanoeletrônica, biotecnologia, instrumentação, sensores e na área ambiental (PASCHOALINO *et al.*, 2010).

A Figura 7 ilustra o ciclo de vida das nanopartículas e os possíveis momentos de contato humano e ambiental.

Figura 7 – Ciclo de vida das nanopartículas e a possibilidade de contato humano e ambiental.



Fonte: Adaptado pelo autor (2019) a partir de US EPA (2007)

A exposição dos seres vivos a nanopartículas acontece em todas as etapas dos ciclos de vida, tanto diretamente, na produção e no consumo de produtos que as contenham, como indiretamente, através do ar, da água e do solo, devido às emissões industriais, incineração e aterros sanitários. Em 2010, Pacholano et al. relataram a relevância de estudos nanotoxicológicos, citando a tendência para a exposição direta de mamíferos roedores a nanopartículas, estudada através da administração intravascular e da inalação desses materiais. Esses métodos permitem investigar os potenciais efeitos das nanopartículas nos sistemas biológicos dos animais, fornecendo contribuições valiosas sobre os mecanismos de interação e possíveis impactos na saúde humana. A compreensão dos efeitos da exposição a nanopartículas em animais terrestres é essencial para avaliar os riscos associados ao uso desses materiais e para orientar a elaboração de estratégias de segurança e a regulamentação da aplicação da nanotecnologia em diversos setores.

5 CONCLUSÃO

Esta revisão bibliográfica ressalta a importância da nanotecnologia como uma alternativa promissora para a remediação ambiental, destacando suas vantagens em termos de baixo custo, de alta eficiência e rápida velocidade na execução das tarefas. A síntese biológica de nanopartículas, especialmente com o uso de organismos vegetais e microrganismos, é enfatizada como uma abordagem viável e sustentável.

No entanto, para avançar nessa área, é fundamental direcionar esforços para futuras pesquisas de novas aplicações da mesma na remediação de diversos tipos de poluentes, visando mitigar os potenciais riscos à saúde e ao meio ambiente associados ao seu uso. Além disso, é crucial considerar formas de garantir a segurança e a aceitação pública da nanotecnologia na remediação ambiental. Isso inclui o desenvolvimento de regulamentações adequadas, a realização de estudos de impacto ambiental abrangentes e a comunicação eficaz dos benefícios e precauções relacionadas ao uso dessas tecnologias.

Ao abordar essas considerações, podemos direcionar os esforços de pesquisa e desenvolvimento de maneira mais eficaz, visando não apenas a inovação tecnológica, mas também a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Água no mundo**. Brasília, DF: ANA, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo#:~:text=Estima%2Dse%20que%2097%2C5,%25%20encontra%2Dse%20nos%20rios>. Acesso em: 25 ago. 2019.
- BINA, H. *et al.* Ethylbenzene removal by carbon nanotubes from aqueous solution. **Journal of Environmental and Public Health**, v. 2012, n. 1, dez. 2011. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jepH/2012/817187/>. Acesso em: 27 ago. 2019.
- BORGES, M. H.; GIORDANO FILHO, A. S.; FÁTIMA DE SOUZA, E. Métodos de remediação *ex situ* com nanopartículas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 4., 2015, São Paulo. **Os Suplementos de Anais [...]**. São Paulo: ABAS, 2019. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29668>. Acesso em: 23 mar. 2019.
- BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, [2019]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 16 jun. 2019.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**: seção I, Brasília, DF, n. 6, p. 470, 9 jan. 1997.
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial da União**: seção I, ano CXLVII, N. 181, Brasília, DF, n. 6, p. 1, 21 set. 2010.
- BRASIL. Portaria nº 3.459, de 26 de julho de 2019. Instituiu a Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia, como principal programa estratégico para incentivo da Nanotecnologia no país. **Diário Oficial da União**: seção I, Brasília, DF, n. 152, p. 286, 8 ago. 2019.
- CHIAVELLI, H. G. R. *et al.* Aplicação de nanomateriais no tratamento de águas residuais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia da Produção, 9., 2019, Ponta Grossa. **[Anais]**. Ponta Grossa: Aprepo, 2019. Disponível em: https://aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/10212019_141036_5.dade95ca079f.pdf. Acesso em: 17 dez. 2019.
- CHINCHILLA-RODRÍGUEZ, Z.; OCAÑA-ROSA, K.; VARGAS-QUESADA, B. How to combine research guarantor and collaboration patterns to measure scientific performance of countries in scientific fields: nanoscience and nanotechnology as a case study. **Frontiers in Research Metrics and Analytics**, v. 1, jul. 2016. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frma.2016.00002/full>. Acesso em: 21 ago. 2019.

CHONG, M. N. *et al.* Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. **Water Research**, Amsterdam, v. 44, n. 10, p. 2997-3027, maio. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135410001739?via%3Dihub>. Acesso em: 25 ago. 2019.

CUNDY A. B.; HOPKINSON L.; WHITBY R. L. Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: a review. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 400, n. 1-3, p. 42-51, ago. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969708007201?via%3Dihub>. Acesso em: 25 ago. 2019.

CUNDY, A. B.; HOPKINSON, L.; WHITBY, R. L. D. Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: a review. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 400, n. 1-3, p. 42-51, ago. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.002>. Acesso em: 20 maio 2019.

DASTJERDI, R.; MONTAZER, M. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: focus on anti-microbial properties. **Colloids Surfaces: Biointerfaces**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 5-18, ago. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/colloids-and-surfaces-b-biointerfaces/vol/79/issue/1>. Acesso em: 25 jan. 2019.

DAVIS, S.; PRAKASH, P.; THAMARAISELVI, K. Nanobioremediation Technologies for Sustainable Environment. In: PRASHANTHI M. *et al.* (ed.). **Bioremediation and Sustainable Technologies for Cleaner Environment**. New York City: Springer International Publishing, 2017. p. 13-33. (Série Environmental Science and Engineering).

DREHER, K. L. Health and Environmental Impact of Nanotechnology: Toxicological Assessment of Manufactured Nanoparticles. **Toxicological Sciences**, Oxford, v. 77, n. 1, p. 3-5, jan. 2004. Disponível em: <https://academic.oup.com/toxsci/article/77/1/3/1711723>. Acesso em: 25 fev. 2019.

ELAHI, N.; KAMALI, M.; BAGHERSAD, M. H. Recent biomedical applications of gold nanoparticles: A review. **Talanta**, [S.l.], v. 184, p. 537-556, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.02.088>. Acesso em: 19 abr. 2019.

EL-NOUR, K. M. M. *et al.* Synthesis and applications of silver nanoparticles. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 3, n. 3, p. 135-140, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313793718_Microbial_Synthesis_of_Noble_Metal_Nanoparticles_Using_Metal-Reducing_Bacteria. Acesso em: 2 abr. 2019.

EUROPEAN UNION. Joint Research Centre. **Report from the workshop on nanotechnologies for environmental remediation**. Ispra: JRC Ispra, 2007. 58 p. Disponível em: www.nanowerk.com/nanotechnology/reports/reportpdf/report101.pdf. Acesso em: 16 jan. 2019.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. C. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 7, p. 1860-1870, ago. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000700033>. Acesso em: 21 ago. 2019.

FEYNMAN, R. P. There's plenty of room at the bottom [1959]. **Engineering and Science**, v. 23, n. 5, p. 22-36. Pasadena: 1976. Disponível em: <https://calteches.library.caltech.edu/1976/1/1960Bottom.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2019.

GEOPRINCY, G. *et al.* A novel approach for studying the combined antimicrobial effects of silver nanoparticles and antibiotics through agar over layer method and disk diffusion method. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures**, Bucuresti, v. 6, n. 4, p. 1557-1565, out./dez. 2011. Disponível em: https://chalcogen.ro/1557_Geoprincy.pdf. Acesso em: 2 abr. 2019.

GUO, R. *et al.* Application research in water treatment of PAMAM dendrimer. **Chemical Industry and Engineering Progress**, [S.l.], v. 31, p. 671-675, 2012.

GURUNATHAN, S. *et al.* Biosynthesis, purification and characterization of silver nanoparticles using *Escherichia coli*. **Colloids Surfaces B: Biointerfaces**, v. 74, n. 1, p. 328-335, 8 ago. 2009.

HAYATI, B. Super high removal capacities of heavy metals (Pb²⁺ and Cu²⁺) using CNT dendrimer. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 336, p. 146-157, ago. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.02.059>. Acesso em: 13 jun. 2019.

HODSON, M. E. The need for sustainable soil remediation. **Elements**, Cidade, v. 6, n. 6, p. 363-368, dez. 2010. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/elements/article-abstract/6/6/363/137863/the-need-for-sustainable-soil-remediation>. Acesso em: 2 fev. 2019.

IJAZ, F. *et al.* Green synthesis of copper oxide nanoparticles using Abutilon indicum leaf extract: Antimicrobial, antioxidant, and photocatalytic dye degradation activities. **Tropical Journal of Pharmaceutical Research**, Benin City, v. 16, n. 4, p. 743-753, abr. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316437721_Green_synthesis_of_copper_oxide_nanoparticles_using_Abutilon_indicum_leaf_extract_Antimicrobial_antioxidant_and_photocatalytic_dye_degradation_activitie. Acesso em: 11 abr. 2019.

KANEL, S. R. *et al.* Removal of arsenic (III) from groundwater by nanoscale zero-valent iron. **Environmental Science and Technology**, Washington, v. 39, n. 5, p. 1291-1298, jan. 2005. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es048991u>. Acesso em: 17 ago. 2019.

KANEL, S. R.; GRENÈCHE, J. M.; CHOI, H. C. Arsenic (V) removal from groundwater using nano scale zero-valent iron as a colloidal reactive barrier material. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 40, n. 6, p. 2045-2050, abr. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/7208051_ArsenicV_Removal_from_Groundwater_Using_Nano_Scale_Zero-Valent_Iron_as_a_Colloidal_Reactive_Barrier_Material. Acesso em: 17 ago. 2019.

KARN, B.; KUIKEN, T.; OTTO, M. Nanotechnology and *in situ* remediation: a review of the benefits and potential risks. **Environmental Health Perspectives**, Washington, v. 117, n. 12, p. 1823-1831, dez. 2009. Disponível em: https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.0900793?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori:rid:crossref.org&rfr_dat=cr_pub%20%20pubmed. Acesso em: 13 mar. 2019.

KONISHI, Y. *et al.* Microbial synthesis of noble metal nanoparticles using metal-reducing bacteria. **Journal of the Society of Powder Technology**, Kyoto, v. 43, n. 7, p. 515-521, jul. 2006.

KRATOCHVIL, D.; VOLESKY, B. Biosorption of Cu from ferruginous wastewater by algal bio-mass. **Water Research**, Dübendorf, v. 32, n. 9, p. 2760-2768, set. 1998.

KUMARI, B.; SINGH, D. P. A review on multifaceted application of nanoparticles in the field of bioremediation of petroleum hydrocarbons. **Ecological Engineering**, Cidade, v. 97, p. 98-105, dez. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092585741630489X>. Acesso em: 3 maio 2019.

LEE, CG. *et al.* Porous electrospun fibers embedding TiO₂ for adsorption and photocatalytic degradation of water pollutants. **Environmental Science & Technology**, Whashington, v. 52, n. 7, p. 4285-4293, 3 abr. 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b06508>. Acesso em: 14 ago. 2019.

LI, S. M. *et al.* Cellulose-silver nanocomposites: microwave-assisted synthesis, characterization, their thermal stability, and antimicrobial property. **Carbohydrate Polymers**, [London], v. 86, n. 2, p. 441-447, ago. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861711003389>. Acesso em: 6 maio 2019.

LI, Y. *et al.* Removal of copper from aqueous solution by carbon nanotube/calcium alginate composites. **Journal of Hazardous Materials**, [St. Louis], v. 177, n. 1-3, p. 876-880, maio. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410000129>. Acesso em: 14 fev. 2019.

LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Sinapse Múltipla**, Betim, v. 5, n. 1, p. 1-14, jun. 2016. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla>. Acesso em: 20 ago. 2019.

LOPEZ-GASSO, A. Scanning tunneling microscopy: the new eyes and hands of the scientists. **Electronics**, Graz, v., n., p. 1-5, mar. 2018. Disponível em: <https://miscircuitos.com/scanning-tunneling-microscopy/#more-1158>. Acesso em: 21 ago. 2019.

MUELLER, N. C.; NOWACK, B. Nanotechnology Developments for the Environment Sector. **Report of the Observatory NANO EU FP7 project**. 2009.

MUELLER, N. C.; NOWACK, B. Nanoparticles for remediation: solving big problems with little particles. **Elements**, [McLean], v. 6, n. 6, p. 395-400, dez. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gselements.6.6.395>. Acesso em: 22 mar. 2019.

NARAYANAN, K. B.; SAKTHIVEL, N. Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 156, n. 1-2, p. 1-13, abr. 2010. Disponível em: doi.org/10.1016/j.cis.2010.02.001. Acesso em: 1 jun. 2019.

NASROLLAHZADEH, M.; SAJADI, S. M. Risks of nanotechnology to human life. In: NASROLLAHZADEH, S. *et al.* **An introduction to green nanotechnology**. [London]: Academic Press, 2019. (Série Interface Science and Technology, v. 28).

NATH, B. K. *et al.* Synthesis and characterization of ZnO:CeO₂:nanocellulose:PANI bionanocomposite. A bimodal agent for arsenic adsorption and antibacterial action. **Carbohydrate Polymers**, [S.l.], v. 148, p. 397-405, set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.091>. Acesso em: 20 abr. 2019.

OLIVEIRA, L. G.; MANTOVANI, S. M. Transformações biológicas: contribuições e perspectivas. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 742–756, maio 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/KN8rswHfwJyqmxyrkC8Gnzf/>. Acesso em: 17 abr. 2019.

ONU. **Os objetivos do desenvolvimento sustentável no Brasil**, [S.l.], [2015] Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 25 ago. 2019.

PASCHOALINO, M. P.; MARCONE, G. P. S.; JARDIM, W. F. Os nanomateriais e a questão ambiental. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 421-430, mar. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/J4kFgpGnQKH7yJ4w65JPhRq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 8 mar. 2019.

PHENRAT, T. *et al.* Partial oxidation (“aging”) and surface modification decrease the toxicity of nanosized zerovalent iron. **Environmental & Science Technology**, Washington, v. 43, n. 1, p. 95-200, jan. 2009. Disponível em: <https://pubs.acs.org/toc/esthag/43/1>. Acesso em: 5 abr. 2019.

RAI, M. Nanobiotecnologia verde: biossínteses de nanopartículas metálicas e suas aplicações como nanoantimicrobianos. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 65, n. 3, p. 44-48, jul. 2013. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252013000300014&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 18 maio 2024.

RAJ KUMAR, S.; GOPINATH, P. Nano-bioremediation applications of nanotechnology for bioremediation. In: WANG, L. K. *et al.* **Handbook of advanced industrial and hazardous wastes management**. Boca Raton: CRC Press, 2017.

REINOLD, E. C. **Síntese, propriedades e aplicações de dendrímeros**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/18853>. Acesso em: 30 maio 2019.

RIZWAN, M. *et al.* Ecofriendly application of nanomaterials: nanobioremediation. **Journal of Nanoparticles**, [S.l.], v. 2014, n. 1, p. 1-7, jun. 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2014/431787>. Acesso em: 12 maio 2019.

SANTOS, V. S. Desastre ambiental em Brumadinho. **Mundo Educação**, [S.l.], fev. 2019. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/desastre-ambiental-brumadinho>. Acesso em: 19 ago. 2019.

SCHORR, J. R. Promise of nanomaterials for water cleanup. **Water Conditioning & Purification**, [S.l.], 26 jan. 2007. Disponível em: <https://wcponline.com/2007/01/26/promise-nanomaterials-water-cleanup/>. Acesso em: 6 maio 2019.

SILVA, D. L.; FERREIRA, M. C.; SCOTTI, M. R. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, Belo Horizonte, v. 24, n. 1-2, p. 136-185, dez. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/mhnjb/article/view/6264/3853>. Acesso em: 18 fev. 2019.

SINGH, N. *et al.* A process for the selective removal of arsenic from contaminated water using acetate functionalized zinc oxide nanomaterials. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, New York, v. 27, n. 4, p. 1023-1029, dez. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258212226_A_Process_for_the_Selective_Removal_of_Arsenic_from_Contaminated_Water_Using_Acetate_Functionalized_Zinc_Oxide_Nano_materials. Acesso em: 23 mar. 2019.

SMITH, S. C.; RODRIGUES, D. F. Carbon-based nanomaterials for removal of chemical and biological contaminants from water: a review of mechanisms and applications. **Carbon**, [S.l.], v. 91, p. 122-143, set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.04.043>. Acesso em: 17 maio 2020.

SOUTO, E. B.; SEVERINO, P.; SANTANA, M. H. A. Preparação de nanopartículas poliméricas a partir da polimerização de monômeros: parte I. **Polímeros**, São Carlos, v. 22, n. 1, p. 96-100, fev. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000006>. Acesso em: 18 mar. 2019.

STEINHÄUSER, K. G.; SAYRE, P. G. Reliability of methods and data for regulatory assessment of nanomaterial risks. **NanoImpact**, Amsterdam, v.7, p. 66-74, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.06.001>. Acesso em: 20 ago. 2019.

TRATNYEK, P. G.; JOHNSON, R. L. Nanotechnologies for environmental cleanup. **Nano Today**, Singapore, v. 1, n. 2, p. 44-48, maio 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1748013206700482?via%3Dihub>. Acesso em: 26 abr. 2019.

TSUJI, J. S. *et al.* Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part IV: risk assessment of nanoparticles. **Toxicological Sciences**, Oxford, v. 89, n. 1, p. 42-50, jan. 2006.

UNDRE, S. B. *et al.* Silibinin binding and release activities moderated by interstices of trimesoyl, tridimethyl, and tridiethyl malonate first-tier dendrimers. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 130, n. 5, p. 3537–3554, dez. 2013.

US EPA. **Nanotechnology White Paper**. Whashington: US EPA, 2007. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/201501/documents/nanotechnology_whitepaper.pdf>. Acesso em: 25 de ago. 2019.

VIEIRA, G. B. **Uso de nanopartículas de ferro zero-valente na remediação de solos contaminados**: degradação redutiva do azul de metileno. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/129389>. Acesso em: 23 fev. 2019.

YADAV, K. K. *et al.* A review of nanobioremediation technologies for environmental cleanup: a novel biological approach. **JMES**, Oujda, v. 8, n. 2, p. 740-757, fev. 2017.

YANG, YF.; CHEN, PJ.; LIAO, V. HC. Nanoscale zerovalent iron (nZVI) at environmentally relevant concentrations induced multigenerational reproductive toxicity in *Caenorhabditis elegans*. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 150, p. 615-623, fev. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.068>. Acesso em: 19 ago. 2019.