

# SÍNTESE VERDE: BREVE ABORDAGEM HISTÓRICA, PROPOSIÇÕES E DESAFIOS NA OBTENÇÃO DE NANOPARTÍCULAS INORGÂNICAS

*Data de aceite: 02/06/2024*

### **Marta Bianca da Costa Rocha**

Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão  
Campus São Luís Monte Castelo  
São Luís-MA  
<https://orcid.org/0000-0002-7032-8963>

### **Simara Ferreira Borges**

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão  
Campus São Luís Monte Castelo  
São Luís-MA  
<https://orcid.org/0000-0003-0246-0505>

### **Manoel Dionizio Moraes Neto**

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão  
Campus São Luís Monte Castelo  
São Luís-MA  
<https://orcid.org/0009-0002-3040-544X>

### **Mirla Cristina Ferreira**

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão  
Campus São Luís Monte Castelo  
São Luís-MA  
<https://orcid.org/0009-0007-0481-158X>

### **Clenilma Marques Brandão**

Doutoranda no Programa de Doutorado em Química (PDQ)  
Docente do Departamento Acadêmico de Química  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão  
Campus São Luís Monte Castelo  
São Luís-MA  
<https://orcid.org/0000-0001-6190-9742>

### **Gilvan Pereira de Figueredo**

Docente do Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ)  
Programa de Doutorado em Química (PDQ) e Departamento Acadêmico de Química (DAQ)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão  
Campus São Luís Monte Castelo  
São Luís-MA  
<https://orcid.org/0000-0002-3989-1360>

## 1. INTRODUÇÃO

A química verde surgiu nos Estados Unidos na década de 1990, como um novo campo científico, e desde então os países europeus têm implementado leis mais avançadas sobre tecnologias verdes (CHEN *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, devido a demanda por mudanças importantes no processo de síntese de materiais que gerem menos resíduos nocivos, diferentes processos e novos esquemas de reação foram desenvolvidos, com o objetivo de minimizar a carga de resíduos químicos para o meio ambiente (SOLTYS *et al.*, 2021; SALEM *et al.*, 2022). A química verde é novo campo de estudos e já está envolvida em grandes áreas, como a novas formas de síntese (usando catalisadores) a substituição de solventes orgânicos tradicionais (em particular, o uso de CO<sub>2</sub> supercrítico) e reagentes de fontes renováveis (SOLTYS *et al.*, 2021).

As novas formas de síntese tem proporcionado a produção de materiais em escala nanométrica, com pelo menos duas de suas dimensões na faixa de 1 a 100 nm, que apresentam melhores propriedades físicas, químicas, fenômenos e atividades biológicas, atribuídos em grande parte à sua dimensão (SHNOUDEH *et al.*, 2019). Esses nanomateriais têm sido comumente obtidos por métodos físicos e químicos. Porém, fatores como o consumo de tempo e energia e a exigência do uso de produtos químicos perigosos como agentes estabilizadores e de nivelamento dessas partículas na síntese por esses métodos convencionais, têm sido considerados (SHAFEY, 2020).

Neste contexto, o uso recente de moléculas ativas em sistemas biológicos naturais, como bactérias, leveduras, algas e fungos ou extratos de folhas, flores, raízes e sementes de diversas plantas na síntese de nanomateriais tem mitigado restrições dos métodos convencionais, visto que a síntese verde é uma opção ecológica e considerada menos tóxica (YING *et al.*, 2022; RUTTKAY-NEDECKY *et al.*, 2019).

Assim, serão abordados neste capítulo, uma breve contextualização histórica da síntese verde articulada com a química verde; a minimização de resíduos e uso de fontes renováveis como princípios básicos da obtenção de nanopartículas verdes; e, por fim, os desafios atuais na proposição de mecanismos reacionais e na produção de nanopartículas em escala industrial.

## 2. SÍNTESE VERDE: UM BREVE HISTÓRICO

Para compreender a busca por rotas sintéticas ecoeficientes, precisa-se entender que antes houve uma demanda por mudanças importantes no modo de produção utilizado para a obtenção de produtos que gerassem menos ou nenhum resíduo nocivo à natureza. Nesse contexto, nas décadas de 1980 e 1990 diversas terminologias para processos ambientalmente seguros dentro da química surgem, como química limpa, química ambiental, química verde, química benigna e química sustentável (LINTHORST, 2010).

A terminologia Química Verde tem sido a mais utilizada, sendo conceituada e definida pela primeira vez no início da década de 1990, há aproximadamente 33 anos (COLLINS, 1997). Definida como a invenção, projeto e aplicação de produtos químicos e processos para diminuir ou evitar a utilização e geração de substâncias nocivas a trabalhadores e consumidores (KULSHRESHTHA, 2015; ANASTAS; WARNER, 1998). Com

isso, importantes programas criados surgem, como o US Presidential Green Chemistry Challenge Awards em 1995 (UNITED STATES, 1996), o Green Chemistry Institute com fundação em 1997 (FORUM, 1999), e a publicação do primeiro volume da Green Chemistry da Royal Society of Chemistry em 1999 (CLARK, 1999).

Nesse viés, foram definidos Os Doze Princípios da Química Verde em 1998 por Paul Anastas e John Warner (Figura 1) que busca a eficiência nos processos químicos, desde a escolha da matéria prima à obtenção do produto final, bem como no planejamento do processo para a mínima geração de resíduos com toxicidade associada (ANASTAS; EGHBALI, 2010).

Dentro desse contexto surge a Síntese Verde que está relacionada a processos de síntese que devem utilizar plantas, micróbios, biopolímeros e resíduos como biocomponente ativo, além de baixo consumo energético e reagente menos tóxicos (BOLADE; WILLIAMS; BENSON, 2020). Segundo Khalaj *et al.* (2020) o termo Síntese Verde ganhou força em 2009, seguido de Biossíntese em 2010, evidenciando uma tendência para reagentes ambientalmente seguros.

Além disso, surge a demanda por rotas que abordam os princípios da química verde no campo da nanotecnologia, área interdisciplinar relacionada a invenção, manipulação e utilização de materiais com pelo menos duas de suas dimensões menores que 100 nm (JADOUN *et al.*, 2021).

**Figura 1.** Os 12 Princípios da Química Verde.



**Fonte:** Adaptado de SILVA JÚNIOR *et al.* (2022).

O conceito foi introduzido por Richard Feynman no encontro anual da American Physical Society (APS) realizado em 1959 (FEYNMAN, 1960), sendo cunhado pelo professor Norio Taniguchi, da Tokyo Science University, em 1974 para explicar a produção exata de materiais (TANIGUCHI, 1974) em escala atômica ou molecular que evoluiu com a inovação científica no século XXI (JADOUN *et al.*, 2021). Em 1998, um artigo sobre a síntese de esferas híbridas de sílica-polímero em nanoescala, se tornou o cerne para nanossistemas híbridos com componentes estruturais inorgânicos e orgânicos (CARUSO; CARUSO; MÖHWALD, 1998).

Assim, a síntese de nanopartículas (NPs) usando-se dos princípios da química verde demonstra diversas vantagens em relação aos métodos convencionais, como a segurança no manuseio e na diminuição de contaminantes no ambiente (MONDAL; ANWESHAN; PURKAIT, 2020). Propriedades únicas estão atreladas às nanopartículas, sendo relacionadas ao tamanho específico, forma, composição, maior área de superfície em relação ao volume e pureza de constituintes individuais, além de várias rotas sintéticas de obtenção, de modo que os métodos físicos e químicos são bastante caros e levam à geração de subprodutos tóxicos, diferentes das rotas biológicas ou biogênicas, onde o mecanismo envolvido é conhecido como síntese verde de nanopartículas (RANA; YADAV; JAGADEVAN, 2020).

Pode-se citar também vantagens e características importantes como a dupla utilidade do componente ativo natural, como o extrato, podendo agir como agente nivelador e capeador (MONDAL; ANWESHAN; PURKAIT, 2020). Os autores apontam também que a síntese verde de nanopartículas tem tido maior atenção nas pesquisas dos últimos anos, com uma rota econômica e ecologicamente correta. E, por fim, Rahman e colaboradores (2022) abordam que nos últimos dez anos, têm sido observados progressos desde a síntese verde a inúmeras aplicações no campo de nanopartículas híbridas.

Observa-se assim, um cenário que abre espaço para inúmeras pesquisas futuras, pois as propriedades potencializadas desses materiais em nanoescala atraem a atenção de pesquisadores que buscam materiais tecnológicos, e amigáveis da natureza, com a menor geração de resíduos secundários, tornando-se o mais próximo possível da sustentabilidade.

### **3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DA SÍNTESE VERDE DE NANOPARTÍCULAS: USO DE FONTES RENOVÁVEIS**

As NPs são de particular importância devido às suas propriedades, como grande área específica em relação ao volume, versatilidade e estabilidade térmica (ABDELGHANT *et al.*, 2018).

Há um número considerável de estudos voltados à síntese de metais em nanoescala empregando os métodos físicos e químicos, porém existem certos deméritos no uso desses métodos convencionais (HUSTON *et al.*, 2021). O consumo de energia, o uso de produtos

químicos perigosos como agentes estabilizadores e de nivelamento das nanopartículas tem impulsionado um número considerável de estudos voltados ao emprego de síntese biológica ou biossíntese (SALEM *et al.*, 2021).

Diferentes fontes biológicas que contêm compostos bioativos proporcionam a formação de nanopartículas mais estáveis (VIJAYARAM *al.*, 2023, KULKARNI *et al.*, 2023). A síntese usando micro-organismos, por exemplo, como fungos e bactérias, pode ocorrer de forma intra ou extracelularmente (SALEM *et al.*, 2021). Os fungos são secretores altamente eficazes de enzimas extracelulares, a membrana plasmática desse microrganismo atua no encapsulamento, além dessas enzimas serem de fácil obtenção proporcionando produção em larga escala (CHAUHAN *et al.*, 2022).

Entre as diferentes fontes verdes, os vegetais são amplamente utilizados na síntese de NPs. As plantas são autótrofos e produtores primários da cadeia alimentar, produzem grande biomassa no meio ambiente e são conhecidos por seus ricos metabólitos secundários que atuam como excelentes agentes estabilizadores e capeadores (YING *et al.*, 2022).

Várias espécies vegetais podem ser usadas na complexação, polimerização, processos de capeamento e estabilização na síntese de nanopartículas de óxidos e na redução e consequente estabilização de nanopartículas metálicas durante a síntese (ROCHA *et al.*, 2021; ROCHA, 2020). Os extratos vegetais, obtidos por diferentes solventes sendo a água mais utilizada, são misturados com as soluções de precursores diferentes condições de reação (SINGH *et al.*, 2018). Parâmetros como temperatura, pH, concentração de sais precursores, tipos e concentração de fitoquímicos afetam a estabilidade e a taxa de formação de NPs, e ainda direcionam a morfologia das nanopartículas fabricadas (SOLTYS *et al.*, 2021)

Compostos biologicamente ativos encontrados em planta devido à presença de grupos funcionais são capazes de reduzir, complexar e polimerizar os íons mais rapidamente do que bactérias ou fungos (SUMANTH *et al.*, 2020). Os metabólitos secundários como flavonoides, alcaloides, terpenoides e os polissacarídeos bioativos, vitaminas e ácidos orgânicos presentes no extrato vegetal ou nos tecidos vegetais estão entre os fitoquímicos essenciais, são os responsáveis pela biorredução e estabilização além de direcionarem a forma e o tamanho das NPs (SOME *et al.*, 2020). Sendo assim, as plantas e seus derivados são recursos renováveis para a síntese verde de nanopartículas e, portanto, esta é uma abordagem considerada sustentável (DIKSHIT *et al.*, 2021).

## 4. SÍNTESE VERDE NO SÉCULO XXI: PROPOSIÇÕES E DESAFIOS

### 4.1 Mecanismos reacionais para a síntese verde utilizando extratos de plantas

Propor um mecanismo de reação na síntese verde, a partir de extratos brutos de plantas apresenta desafios significativos devido à complexidade das biomoléculas presentes nesses extratos. Os extratos brutos de plantas são uma fonte rica e diversificada de compostos orgânicos, como alcaloides, flavonoides, terpenoides, entre outros. Essas

biomoléculas podem ter uma série de interações complexas e potenciais reatividades, o que torna a determinação precisa de um mecanismo de reação bastante desafiador (NGUYEN *et al.*, 2022).

Além disso, as interações entre as biomoléculas presentes nos extratos brutos podem ser complexas e interdependentes. Uma molécula pode interagir com várias outras e influenciar as reações químicas que ocorrem. Portanto, compreender e descrever adequadamente as etapas do mecanismo de reação requer um estudo cuidadoso e detalhado das interações entre as biomoléculas presentes nos extratos brutos (BHATTARAI; ZAKER; BIGIONI, 2018).

Outra dificuldade é estabelecer a seletividade e eficiência da reação desejada na presença de outros componentes presentes nos extratos brutos. As biomoléculas presentes podem ter efeitos inibidores ou catalíticos na reação em questão, o que pode influenciar o resultado final. Identificar as condições ideais para realizar a reação com alta seletividade e eficiência, levando em consideração as interações complexas dos componentes presentes nos extratos brutos, requer estudos cuidadosos e otimização das condições de reação (NGUYEN *et al.*, 2023).

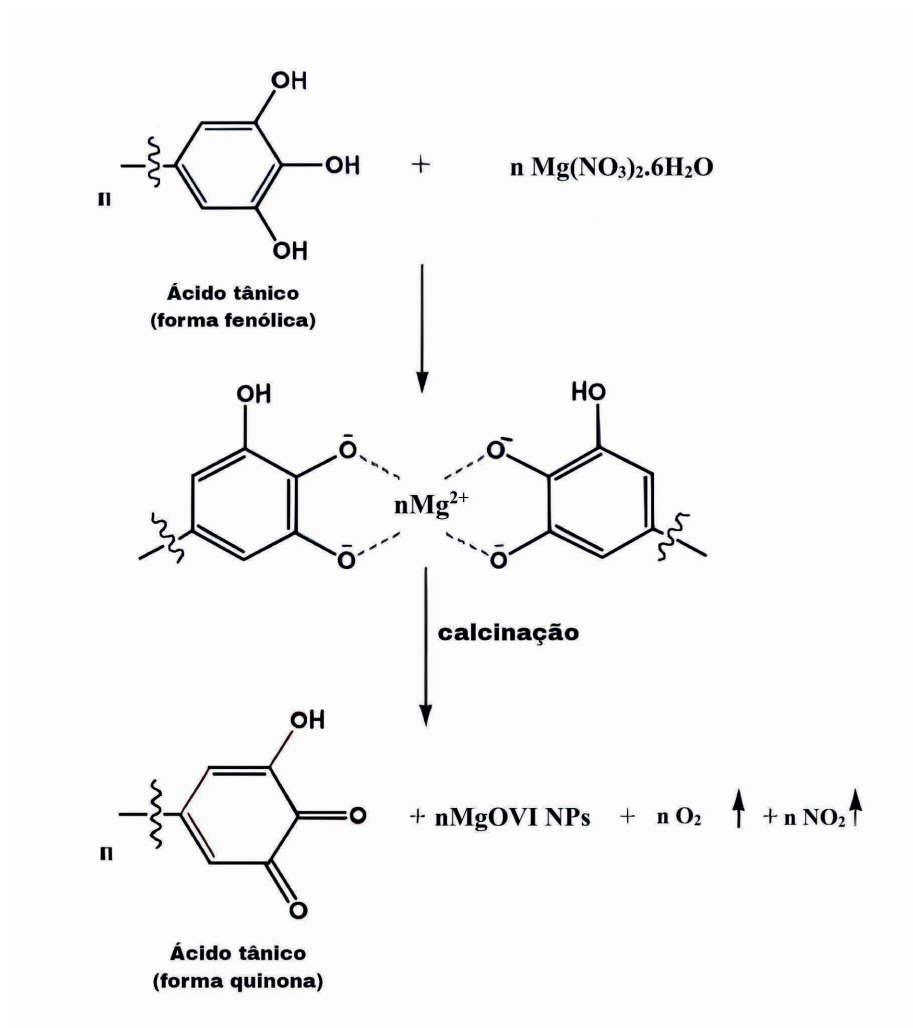
No entanto, na literatura, é possível encontrar propostas de mecanismos reacionais, como o trabalho de D'Souza *et al.* (2021). No estudo, os pesquisadores propuseram um mecanismo para a síntese de nanopartículas de óxido de magnésio (MgO), a partir de ácidos tânico presentes em extratos vegetais. Nesse processo, os ácidos tânico interagem com os sais de nitrato de magnésio da solução precursora, resultando na formação de um complexo estável conhecido como Mg-Ácido tânico. Posteriormente, esse complexo foi submetido à calcinação de 400-600°C, levando à decomposição térmica dos ácidos tânico propostos, proporcionando uma compreensão mais clara do processo de síntese das nanopartículas. A Figura 2 ilustra visualmente as etapas descritas na proposta de mecanismo dos autores.

No trabalho de Supin e Vasundhara (2023), eles não propuseram um mecanismo exato de formação do óxido de zinco a partir das folhas de *Neem* e *Eucalyptus*, apenas apresentaram de forma sucinta como os fitoquímicos funcionalizados (fenois, taninos e flavonoides) auxiliaram na formação desse óxido. No estudo relatam que ao quelar esses fitoquímicos, os íons metálicos de zinco ( $Zn^{2+}$ ) podem ser separados dos componentes aniônicos e reduzidos a formas mais estáveis e a ligação do grupo funcional OH com os íons metálicos resulta na formação de  $Zn(OH)_2$ , indicada pela cor verde intensa. Outros grupos funcionais, como cetona e aldeído, também podem participar do processo de síntese. Sendo o  $Zn(OH)_2$  estabilizado passa por nucleação, crescimento e secagem em estufa de ar quente, formando um precipitado amarelo-alaranjado.

Portanto, os desafios na elaboração de mecanismos de reação para a síntese verde utilizando extratos de plantas apresentam suas complexidades e múltiplas interações que vem sendo aos poucos desvendadas em escala laboratorial. Nesse tópico foram

apresentados dois mecanismos propostos para a síntese de nanopartículas de óxidos metálicos. Todavia, existem na literatura mecanismos melhor estabelecidos para a síntese de nanopartículas metálicas. Por fim, os desafios aqui apresentados se estendem e ganham maior proporção quando se pensa na produção dessas nanopartículas em escala industrial.

**Figura 2.** Mecanismo reacional da formação do MgO.



Fonte: Adaptado D'Souza *et al.* (2021).

## 4.2 Desafios para a produção em escala industrial

A síntese verde, como abordagem para a química sustentável, enfrenta várias problemáticas ao buscar implementar processos químicos mais amigáveis ao meio ambiente em larga escala.

Um dos principais desafios da síntese verde é a escalabilidade dos processos. Embora muitos métodos promissores tenham sido desenvolvidos em laboratórios, nem todos podem ser facilmente adaptados para a produção em larga escala. É essencial garantir que as rotas sintéticas sejam eficientes e viáveis para produzir quantidades significativas do produto final, mantendo os benefícios ambientais (BANDEIRA *et al.*, 2021). A otimização de reações, o uso de catalisadores adequados e a escolha de matérias-primas renováveis são aspectos críticos a serem considerados nesse contexto.

Outro desafio é a economia de matéria-prima. Essa rota de síntese busca reduzir a dependência de recursos não renováveis, promovendo o uso de matérias-primas renováveis sempre que possível. No entanto, a disponibilidade e a sustentabilidade dessas matérias-primas em grande escala podem ser limitadas. Encontrar fontes alternativas de matérias-primas e desenvolver estratégias de reciclagem e reutilização são elementos fundamentais para resolver a problemática do uso em escala industrial da síntese verde (BANDEIRA *et al.*, 2021). Essas abordagens, aliadas a investimentos em pesquisa e desenvolvimento, colaboração entre setores e incentivos governamentais, podem impulsionar a transição para uma indústria química mais sustentável e reduzir o impacto ambiental dos processos químicos. Como afirmado por Anastas e Warner (1998), “a síntese verde é um campo emergente que busca incorporar princípios ambientais diretamente no projeto, fabricação e uso de produtos químicos”. Portanto, é essencial continuar avançando nessa direção para alcançar uma indústria química mais sustentável e minimizar o consumo de recursos naturais.

Desse modo, o gerenciamento de resíduos é outra problemática enfrentada pela síntese verde em larga escala. A produção em grande volume pode resultar em quantidades significativas de resíduos, que podem ser prejudiciais ao meio ambiente se não forem tratados adequadamente. A síntese verde busca minimizar a geração de resíduos por meio de rotas sintéticas mais eficientes e seletivas, além de promover a reciclagem de resíduos e a utilização de subprodutos como matéria-prima em outros processos. No entanto, o desenvolvimento de métodos de reciclagem eficientes e economicamente viáveis ainda é um desafio (MURCIA *et al.*, 2023, LIU; XIE; SHENG, 2022).

Além das questões técnicas, aspectos econômicos e regulatórios também são desafios para a síntese verde em larga escala. Os processos e produtos sustentáveis devem ser competitivos em termos de custo e desempenho em relação às alternativas convencionais, para que sejam amplamente adotados pela indústria. Além disso, regulamentações ambientais e normas de segurança devem ser consideradas para garantir a conformidade legal e o cumprimento das exigências do mercado (PATWARDHAN *et al.*, 2018).

Apesar das problemáticas enfrentadas, a síntese verde continua a avançar, impulsionada pela necessidade de abordagens mais sustentáveis na indústria química. Com esforços contínuos de pesquisa e desenvolvimento, é possível superar esses desafios e promover a implementação bem-sucedida da síntese verde em larga escala, contribuindo para um futuro mais sustentável.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A síntese verde de nanopartículas tem se tornado uma metodologia alternativa sustentável, de relativo baixo custo, eficiente e menos poluente. Sua história é alicerçada na Química Verde e nos avanços tecnológicos dos processos de síntese e preparação de materiais sólidos.

As metodologias alternativas apresentam grandes desafios e, não é diferente com a síntese verde, que apresenta, dentre outros desafios, a proposição de mecanismos reacionais para obtenção de nanopartículas de metais e seus óxidos. Esses mecanismos são cada vez mais difíceis, quanto mais complexa for a composição química da matriz orgânica precursora. Nesse sentido, faz necessário a determinação dos constituintes presentes na matriz do substrato biológico utilizado.

A rota verde também enfrenta a problemática no gerenciamento de resíduos. A produção em larga escala pode resultar em quantidades significativas de resíduos, que podem ser prejudiciais ao meio ambiente se não forem destinados ou tratados adequadamente.

No entanto, sabe-se que há uma grande contribuição dessa metodologia verde para a produção de nanomateriais em larga escala para diversas aplicações, mas sem perder de vista os cuidados com o volume de matéria-prima requerida e de resíduos gerados.

## 6. AGRADECIMENTOS

As agências de Fomento CNPq, CAPES e FAPEMA. Ao IFMA campus São Luís - Monte Castelo. Ao Programa Pós-graduação em Química (PPGQ) e ao Programa Doutorado em Química Associativa UFMA-IFMA (PDQ). Ao Departamento Acadêmico de Química (DAQ). Ao Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Pós-graduação na Amazônia Legal (Edital/CAPES N° 13/2020). Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Materiais Avançados (GPTecMat) e ao Grupo BIOMASSA.

## REFERÊNCIAS

ABDELGHANY, T. M. *et al.* Recent advances in green synthesis of silver nanoparticles and their applications: about future directions, a review. **BioNanoScience**, v. 8, n. 1, p. 5-16, 2018.

ANASTAS, P.; EGHBALI, N. Green Chemistry: Principles and Practice. **Chemical Society Reviews**, v. 39, n. 1, p. 301–312, 2010.

ANASTAS, P.T; WARNER, J. C. **Green chemistry**: theory and practice. Oxford University Press: Oxford, 1998.135p

BANDEIRA, M. *et al.* Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: A review of the synthesis methodology and mechanism of formation. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 15, n. June 2019, p. 100223, 2020.

BHATTARAI, B.; ZAKER, Y.; BIGIONI, T.P. Green synthesis of gold and silver nanoparticles: Challenges and opportunities. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 12, p. 91-100, 2018.

BOLADE, O. P.; WILLIAMS, A. B.; BENSON, N. U. Green synthesis of iron-based nanomaterials for environmental remediation: A review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 13, p. 100279, 2020.

CARUSO, F.; CARUSO, R. A.; MOHWALD, H. Nanoengineering of inorganic and hybrid hollow spheres by colloidal templating. **Science**, v. 282, n. 5391, p. 1111-1114, 1998.

CHAUHAN, A. *et al.* Biogenic synthesis: A sustainable approach for nanoparticles synthesis mediated by fungi. **Inorganic and Nano-Metal Chemistry**, p. 1-14, 2022.

CHEN, Tse-Lun *et al.* Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable development goals: Challenges and perspectives. **Science of the Total Environment**, v. 716, p. 136998, 2020.

CLARK, J. Forum. **Green Chemistry**, v. 1, n. 1, p. G1–G2, 1999.

COLLINS, T. J. Green Chemistry. Em: **Macmillan Encyclopedia of Chemistry**. New York: Simon and Schuster Macmillan. v. 2p. p. 691–697, 1997.

DEVATHA, C. P.; THALLA, A. K. Chapter 7 - Green Synthesis of Nanomaterials. Em: MOHAN BHAGYARAJ, S. *et al.* (Eds.). **Synthesis of Inorganic Nanomaterials**. Micro and Nano Technologies. [s.l.] Woodhead Publishing, 2018. p. 169–184.

DIKSHIT, P. K. *et al.* Green synthesis of metallic nanoparticles: Applications and limitations. **Catalysts**, v. 11, n. 8, p. 902, 2021.

D'SOUZA, J. N. *et al.* Insight into the impact of zinc doping on the structural, surface, and biological properties of magnesium oxide nanoparticles stabilized by *Vateria indica* (L.) fruit extract. **Ceramics International**, v. 47, n. 21, p. 29620-29630, 2021.

FEYNMAN, R. P. There's Plenty of Room at the Bottom. **Engineering and Science**, v. 23, n. 5, p. 22–36, 1960.

Forum. **Green Chemistry**, v. 1, n. 4, p. G99–G101, 1999.

HUSTON, M. *et al.* Green Synthesis of Nanomaterials. **Nanomaterials**, v. 11, n. 8, p. 2130, 2021.

JADOON, S. *et al.* Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 1, p. 355–374, 2021.

KHALAJ, M. *et al.* Green synthesis of nanomaterials - A scientometric assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 122036, 2020.

KRISHNAN, S. *et al.* Chapter 25 - Virus-assisted biological methods for greener synthesis of nanomaterials. Em: KHARISOV, B.; KHARISSOVA, O. (Eds.). **Handbook of Greener Synthesis of Nanomaterials and Compounds**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 785–806.

- KULKARNI, D. *et al.* Biofabrication of nanoparticles: sources, synthesis, and biomedical applications. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 11, p. 1159193, 2023.
- KULSHRESHTHA, A. REVIEW ON GREEN CHEMISTRY AND ITS APPLICATION. **International Journal of Research -GRANTHAALAYAH**, v. 3, n. 9SE, p. 1–3, 30 set. 2015.
- LINTHORST, J. A. An overview: origins and development of green chemistry. **Foundations of Chemistry**, v. 12, n. 1, p. 55–68, 1 abr. 2010.
- LIU, X.; XIE, Y.; SHENG, H. Green waste characteristics and sustainable recycling options. **Resources, Environment and Sustainability**, v.11, p. 1-11, 2022.
- MARQUES, C. A.; MACHADO, A. A. S. C. An integrated vision of the Green Chemistry evolution along 25 years. **Foundations of Chemistry**, v. 23, n. 3, p. 299–328, 1 out. 2021.
- MONDAL, P.; ANWESHAN, A.; PURKAIT, M. K. Green synthesis and environmental application of iron-based nanomaterials and nanocomposite: A review. **Chemosphere**, v. 259, p. 127509, 2020.
- MURCIA, J.E. *et al.* Risk assessment and green chemistry applied to waste generated in university laboratories. **Heliyon**, v. 9, n. 5, 2023.
- NGUYEN, N.T.T. *et al.* A critical review on the bio-mediated green synthesis and multiple applications of magnesium oxide nanoparticles. **Chemosphere**, p. 137301, 2022.
- NGUYEN, N.T.T. *et al.* Green synthesis of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles using plant extracts and their applications: A review. **Science of The Total Environment**, v. 872, p. 162212, 2023.
- PAL, G.; RAI, P.; PANDEY, A. Chapter 1 - Green synthesis of nanoparticles: A greener approach for a cleaner future. Em: SHUKLA, A. K.; IRAVANI, S. (Eds.). **Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles**. Micro and Nano Technologies. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 1–26.
- PATWARDHAN, S.V.; MANNING, J.R.H; CHIACCHIA, M.. Bioinspired synthesis as a potential green method for the preparation of nanomaterials: Opportunities and challenges. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 12, p. 110-116, 2018.
- RAHMAN, A.; CHOWDHURY, M. A.; HOSSAIN, N. Green synthesis of hybrid nanoparticles for biomedical applications: A review. **Applied Surface Science Advances**, v. 11, p. 100296, 2022.
- RANA, A.; YADAV, K.; JAGADEVAN, S. A comprehensive review on green synthesis of nature-inspired metal nanoparticles: Mechanism, application and toxicity. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122880, 2020.
- ROCHA, M. B. da C. *et al.* Recent advances (2016 - 2020) in green synthesis of metal oxide nanoparticles: An overview. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 16, p. e399101623406, 2021.
- ROCHA, M. B. da C. Instituto Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Química. Catalisadores de Ni suportados em LaAlO<sub>3</sub> e  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> preparados por síntese verde para a produção de nanotubos de carbono, 2020. 125f.:il Dissertação (mestrado).
- SALEM, S. S. *et al.* Green synthesis of metallic nanoparticles and their prospective biotechnological applications: an overview. **Biological Trace Element Research**, v. 199, n. 1, p. 344-370, 2021.

- SALEM, S. S. *et al.* A comprehensive review of nanomaterials: types, synthesis, characterization and applications. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 41 de 2022.
- SHAFEY, A. M. El. Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles from plant leaf extracts and their applications: A review. **Green Processing and Synthesis**, v. 9, n. 1, p. 304-339, 2020.
- SHNOUDEH, A. J. *et al.* Synthesis, characterization, and applications of metal nanoparticles. In: Biomaterials and bionanotechnology. **Academic Press**, p. 527-612, 2019.
- SINGH, J. *et al.* 'Green' synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. **Journal of nanobiotechnology**, v. 16, n. 1, p. 1-24, 2018.
- SILVA JÚNIOR, C. A. DA; JESUS, D. P. DE; GIROTTO JÚNIOR, G. Química Verde e a tabela periódica de Anastas e Zimmerman: Tradução e alinhamento com o desenvolvimento sustentável. **Química Nova**, v. 45, p. 1010–1019, 2022.
- SOLTYS, L. *et al.* Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles: Principles of green chemistry and raw materials. **Magnetochemistry**, v. 7, n. 11, p. 145, 2021.
- SUMANTH, B. *et al.* Mycogenic synthesis of extracellular zinc oxide nanoparticles from *Xylaria acuta* and its nanoantibiotic potential. **International Journal of Nanomedicine**, p. 8519-8536, 2020.
- SUPIN, K. K.; VASUNDHARA, M. Green synthesis of ZnO nanoparticles from Neem and *Eucalyptus leaves* extract for photocatalytic applications. **Materials Today: Proceedings**, 2023.
- TANIGUCHI, N. On the Basic concept of Nanotechnology. **Proceeding of the ICPE**, 1974.
- UNITED STATES. The Presidential green chemistry challenge awards program: summary of 1996 award entries and recipients. **Environmental Protection Agency (EPA)**, 1996 . Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/award\\_entries\\_and\\_recipients1996.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/award_entries_and_recipients1996.pdf)>. Acessado em: 20 mai. 2023.
- VIJAYARAM, S. *et al.* Applications of Green Synthesized Metal Nanoparticles—A Review. **Biological Trace Element Research**, p. 1-27, 2023.
- YING, S. *et al.* Green synthesis of nanoparticles: Current developments and limitations. **Environmental Technology & Innovation**, v. 26, p. 102336, 2022.