

## Maximizando potenciais agrícolas com nanotecnologia: aplicações e benefícios

### RESUMO

O uso de nanomateriais para uma agricultura de precisão visa à substituição dos produtos convencionais, por serem sustentáveis e mais eficientes em menores doses de aplicação, tornando-se uma estratégia promissora para enfrentar as consequências advindas do aumento populacional previsto em mais de 25% até 2050. Esta previsão exige maior produtividade agrícola, o que implica maior uso de recursos naturais e maior aplicação de agroquímicos. Este cenário, com uso de produtos convencionais, aumenta o risco de contaminação ambiental, que somado à contínua mudança climática pressupõe risco de extinção de algumas espécies vegetais, inclusive de importância farmacológica. Os nanomateriais são aplicados como: nanofertilizantes, que em razão do seu tamanho extremamente reduzido e sua maior superfície de contato permitem melhor distribuição e absorção; nanoveículos de substâncias complexas ou sensíveis à degradação pela exposição a fatores ambientais, como calor e luminosidade, permitindo entrega sustentada, reduzindo perdas e acúmulo no meio ambiente; Elicitação de compostos bioativos provocada pela propriedade fotocatalítica que alguns nanomateriais apresentam. Esses compostos estão intimamente ligados à tolerância das plantas ao estresse e à germinação de sementes, e são os responsáveis pela potencialidade farmacológica que algumas plantas apresentam, mas que não são amplamente produzidos por elas. Portanto um recurso muito valioso, inclusive para o cultivo de plantas medicinais, que em razão dos benefícios naturais e da baixa toxicidade que apresentam, ganharam maior popularidade nos últimos anos. Assim, esta revisão narrativa explora as atuais aplicações e benefícios dos nanomateriais na agricultura, com ênfase em plantas medicinais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nanoagrotecnologia. Agricultura sustentável. Potencial fotocatalítico. Metabolismo vegetal. Compostos bioativos.

#### Thais Dias e Silva

Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia Goiano (IF  
Goiano), Goiânia, Goiás, Brasil  
[thais.dias@estudante.ifgoiano.edu.br](mailto:thais.dias@estudante.ifgoiano.edu.br)

#### Thiago Dias e Silva

Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia Goiano (IF  
Goiano), Goiânia, Goiás, Brasil  
[thiago.dias1@estudante.ifgoiano.edu.br](mailto:thiago.dias1@estudante.ifgoiano.edu.br)

#### Ribas Antonio da Silva

Colégio Estadual Baltazar Parreira  
São Patrício, Goiás, Brasil  
[ribasantsilva@gmail.com](mailto:ribasantsilva@gmail.com)

#### Eliane Vieira Rosa

Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia Goiano (IF  
Goiano), Goiânia, Goiás, Brasil.  
[eliane.vieira@ifgoiano.edu.br](mailto:eliane.vieira@ifgoiano.edu.br)

## INTRODUÇÃO

A nanotecnologia tem sido uma grande aliada da agricultura, pois apresenta ampla variedade de aplicações para aprimorar o cultivo. Com aproveitamento consideravelmente acima daquele obtido com produtos convencionais, ela promove maior absorção de nutrientes, reduz a dispersão e o acúmulo de defensivos agrícolas no meio ambiente em razão da distribuição sustentada que oferece; permite detecção precoce de estresse na planta; gera adaptações morfofisiológicas significativas, que melhoram a taxa de germinação, a taxa fotossintética, as variáveis de crescimento e a síntese de antioxidantes; aumentam a biomassa, o rendimento e a resistência das culturas às adversidades ambientais (CHANDRASHEKAR et al., 2023; HATAMI et al., 2021).

Esses recursos agronotecnológicos maximizam o rendimento com o menor uso de insumos, o que os tornam uma estratégia de manejo muito importante, elevando a produção agrícola ao nível necessário para atender ao crescimento populacional esperado para os próximos anos (cerca de 25% até 2050) e para enfrentar as consequências desse crescimento, como atenuar os prejuízos causados pelas mudanças climáticas, contaminação ambiental e perda de habitats naturais decorrentes da maior exploração de recursos naturais e da maior aplicação de agroquímicos convencionais (ROSSI et al., 2019; WU; LI, 2022).

As vantagens de utilizar a nanotecnologia estendem-se ao cultivo de plantas com aplicação medicinal, tornando-se uma ferramenta que permite a superação de desafios provenientes da alta demanda por estas plantas (BEGUM et al., 2020; BERNELA et al., 2023; SAMADI et al., 2021), que ocorre em decorrência do reconhecimento de seus benefícios e da sua baixa toxicidade (SAMADI et al., 2023).

O interesse por plantas medicinais e fitoterápicos tem aumentado exponencialmente nos últimos anos em razão do seu potencial farmacológico, que é conferido pela presença de inúmeros compostos bioativos, em especial os compostos do grupo dos polifenóis. Nos últimos anos, percebeu-se uma elevação na demanda destas plantas pelos setores farmacêutico, alimentício, cosmético (BERNELA et al., 2023), e agropecuário (SAMADI et al., 2023). Em contrapartida, a procura elevada gerou exploração indiscriminada, acarretando risco de extinção de várias espécies, decorrente da extração direta de seus habitats naturais (BERNELA et al., 2023).

Ao considerar que muitas plantas medicinais estão ameaçadas de extinção e, associando à crescente procura por diversos setores, o uso da nanotecnologia se torna uma estratégia vantajosa, pois muitos nanomateriais agem de forma eficiente melhorando aspectos de rendimento da cultura e como estimuladores da produção de compostos bioativos (BEGUM et al., 2020; BERNELA et al., 2023; SAMADI et al., 2021).

Assim, esta revisão narrativa buscou reunir trabalhos que abordassem sobre o panorama atual da nanotecnologia na agricultura, com intuito de levantar possíveis aplicações e benefícios dos nanomateriais na produção vegetal, com destaque para a ação elicitora de fitoquímicos e produção de plantas medicinais.

## METODOLOGIA

Esta revisão narrativa traz um breve estudo bibliográfico realizado nas plataformas de busca *Science direct* e *PubMed*, com trabalhos publicados entre os anos de 2018 e 2024. Como critério de inclusão dos artigos, selecionou-se trabalhos que explorassem o panorama atual da nanotecnologia na agricultura, com intuito de levantar possíveis aplicações e benefícios dos nanomateriais na produção vegetal, com destaque para a ação elicitora de fitoquímicos e produção de plantas medicinais. Nesta abordagem, selecionou-se 30 artigos, sendo 6 artigos de revisão e 24 artigos de pesquisa, utilizando termos de busca como *“medicinal plants”*, *“challenges encountered in the cultivation of medicinal plants”*, *“Nanotechnology”*, *“agronanotechnological innovations”*, *“applications of nanomaterials in agriculture”*, *“nanofertilizers”*, *“nanodefenders”*, *“nanocarriers”*, *“nanosensors”*, *“nanomaterial with secondary metabolite elicitors”*, *“influence of nanomaterial on seeds dormancy breakage”*, *“influence of nanomaterials on increasing photosynthetic rate”*.

## DESENVOLVIMENTO (RESULTADOS E DISCUSSÕES)

### INFLUÊNCIA DOS NANOMATERIAIS NO AUMENTO DA PRODUTIVIDADE E DA SÍNTESE DE FITOQUÍMICOS

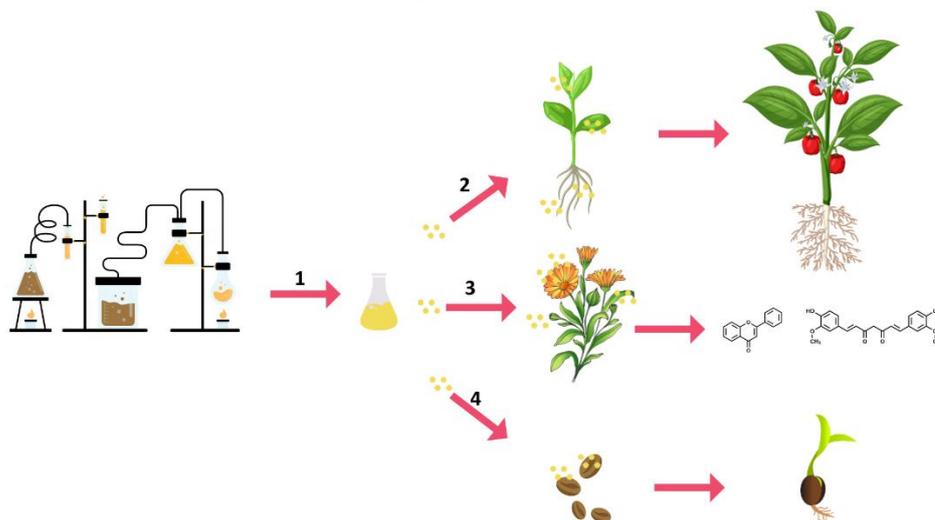
Nanomateriais são compostos sintetizados em laboratório, propositalmente, os quais devem apresentar ao menos uma de suas dimensões em escala entre 1 e 100 nm, denominada escala nanométrica ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). Além da escala diminuta em uma dimensão, estes compostos devem apresentar novas propriedades quânticas, conferindo vantagens inovadoras, as quais não são observadas em materiais similares com escala convencional (macroscópica). Dentre estas novas propriedades, destacam-se maior área superficial, estabilidade térmica, maior reatividade e propriedades optoeletrônicas (SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022; WU; LI, 2022).

A diversidade de nanomateriais, associada às suas novas propriedades e possibilidades de aplicação, relaciona-se fortemente ao método de síntese, associado ao tipo e proporção dos precursores utilizados. Existem diferentes tipos de nanomateriais, os quais podem ser classificados quanto à morfologia (prismáticos, cilíndricos, formato de folhas, tubos, dendrímeros), dimensão (de 0 a 3D), estado físico (sólido, líquido ou gasoso) e composição química, a qual pode ser orgânica, inorgânica ou mista (SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022).

Na agricultura, nanomateriais podem ser aplicados em diferentes setores, tais como na estimulação de processos de germinação de sementes, melhoria no crescimento / desenvolvimento de cultivares e elevação da tolerância a situações de estresse (CHANDRASHEKAR et al., 2023). Desta maneira, observa-se potencialidade crescente desta área, a qual possibilita o desenvolvimento de produtos para a agricultura tais como: nanofertilizantes e nanodefensivos (SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022); nanocarreadores de substâncias complexas ou sensíveis a deterioração (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021); como estratégia de nanocondicionamento de sementes (HATAMI et al., 2021); como elicitores de fitoquímicos (BERNELA et al., 2023; SAMADI et al., 2023); mitigadores de estresse

(MAJEED et al., 2020); e como aparato para melhorar o desempenho fotossintético (CHANDRASHEKAR et al., 2023). Algumas dessas aplicações podem ser observadas Na Figura 1.

Figura 1 – Algumas aplicações de nanomateriais na agricultura: (1) Estimulador de crescimento e desenvolvimento; (2) Elicitor de fitoquímicos; (3) Estimulador de germinação.



Fonte: Arquivo pessoal (2024)

### Nanofertilizantes e nanodefensivos

Nos últimos anos, observa-se elevação no uso fertilizantes em culturas diversas, com objetivo de aumentar o rendimento e a produtividade, porém este uso indiscriminado trouxe alguns problemas, tais como persistência em corpos aquosos, alteração da composição de solos e interferência no desenvolvimento vegetal (SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022).

Em contrapartida, observa-se aumento da pressão sobre o setor agrícola, pois com o aumento populacional esperado para até 2050, estima-se uma demanda por maior produção visando garantir o consumo alimentar, suporte para a pecuária e a produção de biocombustíveis. Esta demanda, para ser garantida, exigirá maior aplicação de agroquímicos que atuem na melhoria da resistência e da produtividade das culturas (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021).

O uso de fertilizantes usuais visando melhorar aspectos correlatos à produção agrícola, em qualidade e quantidade, é algo necessário, porém os produtos químicos convencionais podem apresentar alto custo, baixa absorção dos nutrientes, potencial risco de toxicidade ao ser humano e ao ambiente em decorrência, principalmente, da persistência no solo e na água (ELSAIED et al., 2022; SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022). Estima-se que cerca de 75% dos pesticidas não atingem o seu alvo vegetal, tornando-se risco eminente de toxicidade ao ambiente e ao ser humano. Essa queda na eficiência também é observada com fertilizantes, onde estima-se perda de 50% e 10% de nitrogênio por volatilização e lixiviação, respectivamente (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021).

A utilização de nanomateriais pode reduzir a quantidade de agroquímicos usuais aplicados (SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022), pois estes podem aumentar exponencialmente a absorção de nutrientes pela planta, decorrente das propriedades devido à escala nanométrica, tais como aumento da superfície de contato, melhoria da captação de nutrientes e seu acesso ao floema, culminando com aumento da produção, redução da deposição ambiental e redução nos custos de aplicação (ELSAYED et al., 2022). Desta forma, o uso da nanotecnologia torna-se uma abordagem de grande destaque para aumentar a produção vegetal e reduzir a contaminação de agroecossistemas (NEKOUKHOU et al., 2022), tornando-se uma alternativa mais sustentável e eficaz (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021).

No âmbito relacionado à entrega de nutrientes, há relatos de ação realizada de forma direta, após a síntese das nanopartículas, ou por nanorevestimento / encapsulamento da substância nutritiva com um nanomaterial (ELSAYED et al., 2022). Nanomateriais fosfatados, por exemplo, mostraram-se mais eficientes que os fertilizantes fosfatados comerciais.

Nanopartículas de hidroxiapatita (nano-HA), uma das formas cristalinas do fosfato de cálcio, com aproximadamente 24 nm, foram recentemente testadas como nanofertilizantes por via foliar no cultivo de *Rosmarinus officinalis* L. (alecrim). Seu desempenho foi comparado ao grupo controle que recebeu apenas água e ao grupo que recebeu o tradicional fertilizante NPK (nitrogênio, fosforo e potássio). Os resultados mostraram que na concentração de 0,5 e 1 g L<sup>-1</sup> ocorreram alterações diferentes e significativas ao nível anatômico e fisiológico com o uso do nanofertilizante, que levaram a um aumento superior em ambos os grupos, tanto no teor de componentes disponíveis, como na quantidade de óleo essencial apresentado por esta cultura, além de melhorarem o seu crescimento. Portanto o nano-HA mostrou-se mais promissor para o cultivo de alecrim, especialmente sob a concentração de 0,5 g L<sup>-1</sup>, apresentando os melhores resultados (ELSAYED et al., 2022).

Suplementação com nanopartículas de óxido de zinco (ZnONPs) via foliar em uma planta medicinal conhecida como cabeça de dragão (*Dracocephalum moldavica* L.), em solos pobres de zinco, foi testada comparativamente à suspensão convencional de óxido de zinco (ZnO). Ambos os compostos elevaram a acumulação foliar de zinco, a clorofila total e os flavonoides de maneira dose-dependente, contudo o nanofertilizante a 160 mg L<sup>-1</sup> mostrou-se bem mais eficiente e apresentando forma segura para aplicação. As plantas que receberam esta dosagem apresentaram maior número de folhas, ramos, volume de planta, maior pigmentação verde, em razão do maior teor de clorofila. Contudo, plantas submetidas ao tratamento com 400 mg L<sup>-1</sup> de ZnOPs apresentaram estresse oxidativo e diminuição do teor de clorofila, com aumento no nível de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e malonaldeído (MDA), indicando peroxidação lipídica da membrana. O acúmulo de Zn em 160 mg L<sup>-1</sup> de ZnONPs foi de 153 mg kg<sup>-1</sup>, sendo significativamente ( $p < 0,05$ ) maior do que concentrações comparáveis de tratamentos com ZnS, que alcançou uma concentração de 96,6 mg kg<sup>-1</sup>. O conteúdo total de flavonoides aumentou com todas as dosagens do tratamento com ZnONPs, alcançando a maior concentração 3,49 mg g<sup>-1</sup> sob a dosagem de 400 mg L<sup>-1</sup> que foi significativamente maior que o ZnS ( $p < 0,05$ ) em todas as concentrações testadas (NEKOUKHOU et al., 2022). Além disso, com o uso do nanofertilizante houve aumento significativo da biomassa aérea, teor de óleo

essencial e rendimento, em comparação ao tratamento convencional e ao grupo controle. Ao contrário dos tratamentos com ZnONPs, a relação dose-resposta entre a biomassa da parte aérea e os tratamentos com ZnS foi linear, e a biomassa aumentou de maneira dependente da dose. A biomassa da parte aérea foi maior no tratamento com 160 mg L<sup>-1</sup> de ZnONPs (2.168 kg ha<sup>-1</sup>) em comparação com o controle e concentração equivalente de ZnS (42% e 5,7%, respectivamente;  $p < 0,05$ ). O teor de OE a 160 e 400 mg L<sup>-1</sup> de ZnONPs (3,4 e 2,0 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente) foi superior à concentração equivalente de ZnS (1,9 e 1,3 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente) ( $p < 0,05$ ). Estes resultados indicam que este nanofertilizante pode aprimorar o valor medicinal e comercial desta planta com menor risco de contaminação ambiental em razão do melhor aproveitamento do produto (NEKOUKHOU et al., 2022).

A complementação nutricional durante o cultivo é comumente realizada para aprimorar o rendimento e a qualidade da produção. O uso de zinco, especialmente em solos pobres nesse micronutriente, é indispensável, pois está envolvido na ativação de algumas enzimas, divisão celular, manutenção da estrutura da membrana e fotossíntese, além de atuar como cofator regulador na síntese proteica. Contudo seu excesso pode incorrer em fitotoxicidade, com sérios danos morfofisiológicos que resultam na perda de rendimento. Portanto a utilização de nanofertilizantes, além de mitigar a deficiência nutricional e reduzir o risco de acúmulo ambiental, evita o risco de toxicidade para a planta porque esse sistema permite que a entrega do nutriente seja realizada de forma controlada (ROSSI et al., 2019).

Nanomaterial de mesma composição também demonstrou eficiência na promoção do crescimento / desenvolvimento do café (*Coffea arabica* L.), com mesma metodologia de aplicação, em comparação ao tratamento com sulfato de zinco tradicional. Assim como no estudo anterior, ambos os tratamentos elevaram a concentração de zinco foliar, contudo as plantas que receberam o tratamento com as nanopartículas apresentaram os maiores teores (1267,1 mg kg<sup>-1</sup> DW) quando comparadas às plantas tratadas com ZnSO<sub>4</sub> (344,1 mg kg<sup>-1</sup> DW), enquanto as plantas controle tiveram o menor teor de Zn no tecido foliar (53,6 mg kg<sup>-1</sup> PS). ZnONPs também afetaram positivamente a taxa fotossintética líquida em 55%, a massa fresca em 37% e 95% nas raízes e folhas, e a massa seca em 28%, 85% e 20% nas raízes, caules e folhas, respectivamente (ROSSI et al., 2019).

Ambos os autores sugerem que este sucesso decorre do tamanho reduzido do nanomaterial e da maior área de superfície de contato que apresentam, possibilitando maior penetração e translocação dentro da folha.

A aplicação de doses abaixo de 10 mg L<sup>-1</sup> de nanopartículas de selênio (nSe) apresentaram efeitos promotores de crescimento, enquanto doses entre 10 e 30 mg L<sup>-1</sup> foram associadas à toxicidade grave e anormalidades no desenvolvimento de folhas e raízes em pimenta (*Capsicum annum*), uma pimenta muito importante na indústria alimentícia e farmacêutica em razão das propriedades medicinais que exibe. O autor sugere que o nanomaterial exerça modulação na sinalização de hormônios, como etileno, auxina, ácido salicílico e citocinina, os quais estão envolvidos em diversos processos de crescimento na planta e associa os efeitos tóxicos à hipermetilação do DNA provocadas pelas maiores doses de nSe (SOTOODEHNIA-KORANI et al., 2020).

Em se tratando de ação de proteção de plantas, nanoformulações diversas apresentaram eficácia superior contra fitopatógenos (nematóides, fungos e bactérias inclusive as multirresistentes) quando comparadas aos seus equivalentes convencionais, pois permitem maior adsorção ao microorganismo, causam danos físicos e oxidativos em suas membranas celulares, alteram sua fisiologia e inibem seu desenvolvimento (SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022), fato correlacionado ao tamanho reduzido destes compostos, o qual facilita a penetração celular e aumenta a superfície de contato (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021). Alguns nanomateriais apresentam atividade antifúngica melhorada, como é o caso dos nanomateriais à base de quitosana, que devido a sua natureza policatiônica aumenta a permeabilidade da membrana levando à morte do patógeno (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021).

Na grande maioria das vezes as perdas de produção são decorrentes de infecções causadas por fitopatógenos, especialmente fungos. Para atenuar esses danos os defensivos agrícolas são utilizados de maneira indiscriminada, fato que resulta no surgimento de resistência microbiana e trazem sérios problemas ambientais (LI; LIU, 2024).

Diferentes tipos de nanomateriais demonstraram eficácia significativa no combate a patógenos em plantas, inclusive microrganismos resistentes, além de serem ambientalmente amigáveis, mostrando-se como uma alternativa valiosa aos tradicionais defensivos aplicados (LI; LIU, 2024).

O tratamento com nanopartículas de óxido de zinco (ZnONPs) na concentração de  $300 \mu\text{g mL}^{-1}$  demonstrou segurança de aplicação e foi eficaz contra *Fusarium oxysporum* em pepinos. Este tratamento aumentou o teor de clorofila, nitrogênio e atividade de enzimas de defesa, e melhorou a fisiologia da raiz, o que resultou no maior crescimento das plantas e na redução da severidade da doença da murcha do *Fusarium* (LI; LIU, 2024).

Nanopartículas de óxido de cobre derivadas de extrato de folha de *Zizyphus spina* (CuO-Zs-NPs) foram testadas comparativamente a duas marcas de fungicidas à base de cobre, que são amplamente utilizados, mas geram grande deposição no solo agrícola, para o tratamento contra o agente causador da podridão radicular em tomateiros (*Lycopersicon esculentum* L.). Todas as dosagens testadas (50, 100 e  $250 \text{ mg L}^{-1}$ ) foram capazes de estimular a germinação de sementes, parâmetros de crescimento e diminuir os sintomas causados por essa doença, contudo a dosagem de  $250 \text{ mg L}^{-1}$  mostrou-se significativamente mais eficaz que seus correspondentes a granel contra *Fusarium solani*, reduzindo a severidade e incidência da doença e promovendo o vigor das plântulas, demonstrando que esses bionanomateriais são potenciais alternativas mais seguras para uso (EL-ABEID et al., 2024).

Nanopartículas de óxido de magnésio (NPs de MgO), sintetizadas a partir de extratos de limão, comprovaram seu potencial fungicida em  $100 \text{ mg L}^{-1}$  contra *Alternaria dauci* em cenouras, resultando em crescimento melhorado e redução nos índices de mancha foliar (AHAMAD et al., 2023).

Nanopartículas de óxido de zinco dopadas com cobre em 2% (ZnO/Cu<sub>2%</sub>) mostraram eficiente atividade antifúngica contra quatro importantes fitopatógenos que acometem a agricultura. Estas nanopartículas tiveram sua atividade antifúngica aumentada, em comparação às nanopartículas de ZnO e CuO puras, e foram particularmente eficazes na concentração de  $0,75 \text{ mg mL}^{-1}$

---

para inibir 80% do crescimento de *Neofusicoccum arbuti* e *Alternaria alternata* e na concentração de 1 mg mL<sup>-1</sup> para atingir essa inibição em *Fusarium solani* e *Colletotrichum gloeosporioides* (PARAGUAY-DELGADO et al., 2022).

### Nanocarreadores

Nanocarreadores são veículos aprimorados para transporte e entrega de substâncias complexas, transpondo barreiras biológicas com foco em alvos específicos. Estas características permitem redução em perdas e em toxicidade para órgãos não alvos. Normalmente são fabricados com nanomateriais poliméricos, biocompatíveis e biodegradáveis, o que também reduz seu acúmulo na planta e no ambiente (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021).

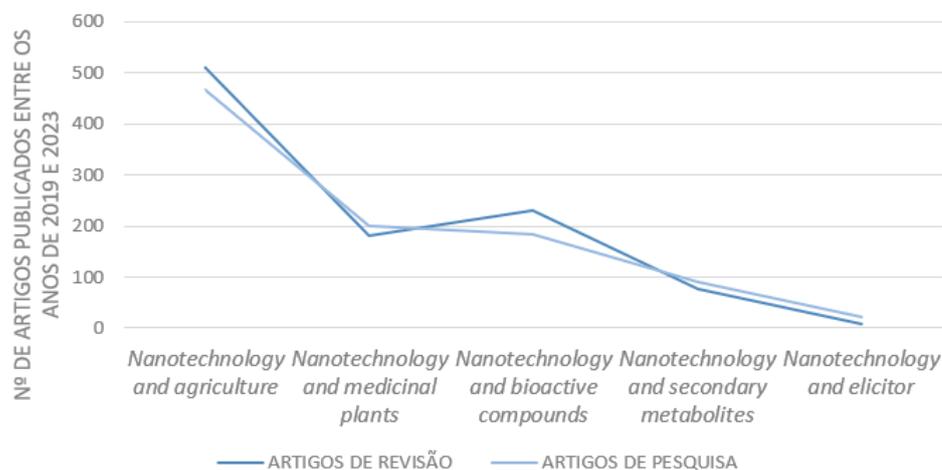
Neste grupo, destacam-se os nanomateriais à base de quitosana, a qual produz uma cápsula protetora em torno de compostos químicos específicos, protegendo-os contra degradação e propiciando a liberação dos mesmos, de forma controlada (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021).

Como aplicabilidade importante, pode-se destacar nanocarreadores liberadores de óxido nítrico, os quais, pela ação controlada e sustentada, evitam perdas por fotossensibilidade e instabilidade de doadores (SILVEIRA et al., 2021). Dentro desta vertente, nanocarreadores podem ser sintetizados para minimizar perdas e facilitar a dispersão de agrotóxicos, os quais necessitam de solventes para dispersão para uso convencional, devido à sua hidrofobicidade. Através dos nanoveículos, sua liberação ocorre de forma controlada, podendo reduzir sua acumulação e toxicidade ao meio ambiente (SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022).

### Nanomateriais elicitores de metabólitos secundários

No que tange às temáticas associando nanotecnologia à agricultura e às plantas medicinais, pesquisa na plataforma de busca “*Science Direct*” com delimitação nos últimos cinco anos, mostra o aumento no número de publicações acerca do uso da nanotecnologia na agricultura de forma ampla, e confirma a necessidade de ampliação dos estudos voltados à ação elicitora de nanomateriais (Figura 2).

Figura 2 – Número de publicações na plataforma *Science direct* no período de 2019 a 2023 com uso de termos em inglês que associam nanotecnologia à agricultura, plantas medicinais, compostos bioativos, metabólitos secundários e elicitores.



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Alguns destes estudos trazem evidências do potencial da nanotecnologia na elicitação de compostos bioativos, como flavonoides e fenóis, em plantas medicinais, que são os responsáveis por conferir potencial farmacológico a essas plantas (BERNELA et al., 2023).

Embora não estejam diretamente ligados ao crescimento vegetal, esses compostos são produzidos em alguns estágios de crescimento e têm um papel crucial na adaptação ao ambiente e na resposta a condições de estresse (BERNELA et al., 2023; SAMADI et al., 2021), além de serem usados em uma variedade de produtos comercialmente valiosos, incluindo produtos farmacêuticos, cosméticos e agropecuários (BERNELA et al., 2023; SAMADI et al., 2023).

Outro estudo concorda sobre o uso de plantas medicinais nestas áreas. E ressalta que o valor apresentado por determinada planta medicinal está associado à quantidade de metabólitos secundários que ela apresenta (HATAMI et al., 2021).

No entanto, a concentração de metabólitos secundários não é encontrada prontamente nas plantas medicinais, tampouco em concentração linear, pois estes são produzidos em resposta a uma condição de estresse (CHANDRASHEKAR et al., 2023).

A baixa disponibilidade desses compostos aliada às questões ambientais e ao risco de extinção de algumas espécies decorrente do aumento da sua demanda, da exploração indiscriminada, e dos riscos inerentes ao aumento populacional previsto para as próximas décadas, realçam a necessidade de se desenvolver estratégias capazes de ampliar e padronizar o fornecimento desses bioativos de forma sustentável (BERNELA et al., 2023; HATAMI et al., 2021).

Retirá-los diretamente de seu habitat natural aumenta o risco de extinção, além disso não apresentam regularidade no conteúdo desses compostos. A elicitação é utilizada para aumentar e padronizar essa produção (SAMADI et al.,

2021), aumentar esse rendimento em benefício do uso comercial (TIAN; GHORBANPOUR; KARIMAN, 2018).

Outro estudo destaca a necessidade de modelos de manejo que sejam eficientes e sustentáveis para enfrentar problemas ocasionados pelo aquecimento global e pelo grande aumento populacional que impactam diretamente na capacidade de renovação desses recursos naturais (NEKOUKHOUE et al., 2022). Logo, a disponibilização de plantas medicinais em larga escala, com concentração ideal desses compostos, garantindo sua qualidade e importância comercial são os principais desafios encontrados para suprir essa alta demanda (BERNELA et al., 2023).

Nesta vertente, destaca-se o uso de elicitores como estratégia para aumento da produção de compostos bioativos, onde nanomateriais podem melhorar a eficiência em induzir o sistema de defesa da planta, melhorando a síntese de alguns fitoquímicos (NOUROZI et al., 2019). Nanomateriais do grupo das nanopartículas surgiram neste cenário como uma forte estratégia para o aumento dos metabólitos secundários, enquanto a propagação *in vitro* é sugerida como melhor opção para alcançar a padronização e uniformidade em sua concentração (BERNELA et al., 2023).

A capacidade de nanomateriais em promover a modulação bioquímica está diretamente ligada ao seu tamanho e concentração. Segundo os autores, os nanomateriais possuem maior facilidade de penetração celular, uma característica que melhora sua capacidade de interação com a planta, resultando na sua forte habilidade elicitora (BEGUM et al., 2020). Outra pesquisa salienta que as respostas podem variar entre espécies, porém em muitos casos estudados, as nanopartículas à base de carbono e de metais têm mostrado resultados positivos no estímulo de produção de compostos e enzimas antioxidantes (CHANDRASHEKAR et al., 2023).

Estudos evidenciaram elevação da concentração de metabólitos secundários em algumas culturas tratadas com nanomateriais. Nanopartículas de prata, por exemplo, independente das rotas de síntese biológica ou química, mostraram-se eficientes no acúmulo de biomassa e no desencadeamento da produção de compostos fenólicos e flavonoides em *Fagonia indica*. Entretanto, aqueles produzidos por rotas biológicas, apresentaram os melhores resultados, possivelmente em função da sua biocompatibilidade. Os autores também constataram que inicialmente as doses mais baixas estimularam o acúmulo de biomassa, enquanto as concentrações mais altas diminuíram a biomassa e aumentaram a concentração desses compostos. Contudo, após 40 dias observaram uma possível adaptação da planta à exposição aos nanomateriais com novo aumento da biomassa e redução dessas concentrações (BEGUM et al., 2020).

Nanotubos de carbono de parede única (SWCNTs), nas dosagens de 50 e 100  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , e nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNTs) nas dosagens de 500 e 1000  $\mu\text{g mL}^{-1}$  (SAMADI et al., 2023), aplicados como suplementação do meio de cultura no cultivo de tomilho (*Thymus daenensis*), demonstraram capacidade de penetração celular, que permite melhor interação com receptores de membrana, ativando vias de sinalização e gerando EROs, as quais induziram a síntese de metabólitos farmacologicamente importantes (SAMADI et al., 2021).

Estudo realizado com a planta medicinal *Salvia verticillata* demonstrou que a aplicação foliar de baixas doses de MWCNTs favorecem a síntese de metabólitos secundários. Este experimento demonstrou aumento significativo (4 vezes maior) no teor de ácido rosmarínico, composto fenólico com propriedades farmacológicas, em resposta a uma pequena indução na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), enquanto altas concentrações de MWCNTs (a partir de 100 mg L<sup>-1</sup>) apresentaram toxicidade e resultaram em danos oxidativos em razão do grande aumento na geração de ERO (RAHMANI; RADJABIAN; SOLTANI, 2020).

Diferentes concentrações de nanopartículas de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub> NPs) foram avaliadas quanto ao seu efeito na produção de fitoquímicos de importância farmacêutica em *Dracocephalum kotschy* Boiss. Esta planta é destaque no âmbito medicinal pela presença de propriedades anticancerígenas e, contudo, existem relatos de que a mesma se encontra em risco de extinção. Os resultados do experimento demonstraram que alguns fitoquímicos estavam presentes apenas nas plantas elicitadas e que as nanopartículas foram eficientes para aumentar o teor de todos os compostos bioativos presentes. Na concentração de 100mg L<sup>-1</sup>, houve aumento em 8,26 vezes no teor de ácido rosmarínico (composto fenólico) em 24h após exposição, e em até 13 vezes o teor de xantomicol (flavonoide) na concentração de 200mg L<sup>-1</sup> em 48h (NOUROZI et al., 2019).

Outro estudo comparou a influência do uso de dois agentes elicitores de metabólitos secundários em *Melissa officinalis* L., de forma individual e combinada: (1) as rizobactérias promotoras do crescimento de plantas - PGPR (sendo utilizadas para fins do estudo *Pseudomonas* spp, mais especificamente, *P. fluorescens* e *P. putida*) e, (2) as nanopartículas de silício (nSi). Os resultados observados mostraram que, individualmente, cada agente promoveu o aumento de teor de compostos bioativos, porém, o tratamento combinado alcançou os melhores resultados. O *priming* de sementes com 100 mg L<sup>-1</sup> nSi associada a inoculação de plantas com *P. fluorescens* aumentou em 2,6 vezes o conteúdo total de flavonoides em comparação com o controle, também maior que quando apenas inoculado. O maior aumento (49,8%) no teor de compostos fenólicos e (78,1%) no teor de óleo essencial, também ocorreram com tratamento combinado, com inoculação com *P. putida* em ambos os casos, e aplicação de 500 e 100 mg L<sup>-1</sup> nSi, respectivamente (HATAMI et al., 2021).

Pesquisa realizada por NEKOUKHOU et al. (2022), sugere que a aplicação de nanopartículas de óxido de Zn (ZnO NPs), via foliar, na concentração de 160 mg L<sup>-1</sup> poderia agregar valor à cultura cabeça de dragão (*Dracocephalum moldavica* L.) e proporcionar retorno econômico significativo por aumentar consideravelmente o rendimento de óleo essencial e a síntese de flavonoides, sendo ainda uma abordagem mais segura para o ambiente.

Outra metodologia de aplicação de nanomateriais é mediante suplementação do meio de cultivo. Pesquisa com suplementação de *Atropa belladonna* com diferentes concentrações de nanopartículas de óxido de manganês (Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) mostrou ser eficaz na regulação da concentração de metabólitos secundários, de maneira dose-dependente. A aplicação de 100 mg L<sup>-1</sup> foi mais eficiente para aumentar o teor de fenólicos e flavonoides totais em 3,5 e 4,49 vezes, respectivamente, enquanto a dosagem de 25 mg L<sup>-1</sup> elevou em 2,92 vezes o teor de alcaloides. Na concentração de 25 mg L<sup>-1</sup> foi observado maior

número e alongamento de brotos, maior comprimento e peso fresco de raiz, e maior teor de clorofila, enquanto, concentrações acima de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  diminuíram o teor de clorofila e de metabólitos secundários, e apresentaram efeitos inibitórios e tóxicos. (TIAN; GHORBANPOUR; KARIMAN, 2018). Outros autores afirmam que os efeitos dos nanomateriais, além de serem dose-dependentes, podem variar entre as diferentes espécies (CHANDRASHEKAR et al., 2023; MAJEED et al., 2020).

Desta maneira, é evidente a importância da ação elicitora que alguns nanomateriais apresentam e suas possibilidades de melhorias nos teores de compostos medicinais, decorrentes, muitas vezes, da propriedade de estimular a formação de espécies reativas de oxigênio em quantidade não tóxica, porém, suficiente para ativar vias de sinalização em plantas e, conseqüentemente, modular a expressão de genes que codificam enzimas diretamente envolvidos no processo de síntese de metabólitos secundários (SAMADI et al., 2023; TIAN; GHORBANPOUR; KARIMAN, 2018).

### Nanomateriais e aumento da tolerância ao estresse

Diversos autores concordam que condições de estresse em plantas, sejam bióticas ou abióticas, em destaque o estresse hídrico, prejudicam fortemente o crescimento e o rendimento da cultura, promovendo sérios prejuízos financeiros, o que torna imprescindível a adoção de técnicas de manejo eficientes (CHANDRASHEKAR et al., 2023; MAJEED et al., 2020; RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021).

A nanotecnologia surge neste contexto como uma opção para suprir esses danos, pois gera ganho de eficácia em torno de 30% com relação aos seus equivalentes tradicionais e induz respostas fisiológicas na planta que podem aumentar a tolerância ao estresse. Nanopartículas de Óxido Cério ( $\text{CeO}_2$ ), de Óxido de Manganês ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ), e nanomateriais à base de carbono são exemplos de nanomateriais que adquiriram essa capacidade em razão da propriedade fotocatalítica que apresentam (WU; LI, 2022).

Nanopartículas à base de carbono e metais têm demonstrado efeitos benéficos em plantas sob situações de estresse. Esta ação pode estar associada à estimulação do aumento no teor de prolina e outras ações, tais como: restauração do equilíbrio osmótico; regulação da síntese de fitohormônios que favorecem o desenvolvimento das raízes e expansão de poros, ajudando a melhorar a absorção de água e nutrientes; melhora do aparato fotossintético, resultando em maior absorção de luz; ajuda na regulação da taxa de transpiração e retenção de água celular; e aumento do teor de compostos e enzimas antioxidantes, minimizando desta forma as perdas de produtividade e, conseqüentemente, as econômicas (CHANDRASHEKAR et al., 2023).

A aplicação de nanomateriais à base de carbono, como nanotubos de carbono de parede simples (SWNT) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWNT), demonstrou eficiência no aumento da tolerância ao estresse, pois aumentaram a disponibilidade de nutrientes para a planta, estimulando seu crescimento e também melhorou a eficiência de uso de agroquímicos e potencializou a atividade fungicida, além de provocar alterações na expressão

gênica, no aparato fotossintético e estimular o sistema de defesa antioxidante em razão da formação de espécies reativas de oxigênio (MAJEED et al., 2020).

Nanomateriais poliméricos, como os de quitosana, também apresentaram resultados positivos no aumento da tolerância ao estresse. Estes nanomateriais foram empregados na nanoencapsulação de alguns pesticidas, alcançando resultados mais eficientes no combate a diferentes agentes fitopatogênicos com menor quantidade de produto aplicado; apresentaram menor toxicidade às plantas e menor deposição no meio ambiente. Além disso, a quitosana teve sua função fungicida aumentada em razão da maior permeabilidade celular adquirida quando em nanoescala (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021). Estes nanomateriais também são utilizados na nanoencapsulação de nutrientes e fitohormônios, para proteção dessas substâncias contra a degradação provocada por fatores ambientais, logo uma maior quantidade é absorvida, melhorando assim a eficiência de recuperação de plantas sob estresse (RAMACHANDRAIAH; HONG, 2021).

Calos celulares de *Plantago major* submetidas a déficit hídrico induzido que receberam o tratamento com óxido de nanografeno (NGO) nas concentrações de 100 e 200  $\mu\text{g mL}^{-1}$ , apresentaram efeitos mitigadores do estresse, reduzindo os níveis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e aumentando o teor de prolina, melhorando seu crescimento em comparação com as plantas não tratadas, enquanto doses mais altas de NGO (400 e 800  $\mu\text{g mL}^{-1}$ ) resultaram em estresse oxidativo e efeitos tóxicos nos tecidos calosos (GHORBANPOUR; KHALTABADI FARAHANI; HADIAN, 2018).

Compostos farmacologicamente importantes, como relatado anteriormente, são produzidos em resposta ao estresse hídrico, como é o caso de alguns alcaloides com propriedade anticâncer, que são produzidos por espécimes de vinca (*Catharanthus roseus*). Apesar deste ganho, esse mesmo estresse interfere negativamente no crescimento da planta e muitas vezes causa danos severos. Uma pesquisa testou o uso de nanopartículas de quitosana (CSNPs) nesta cultura, sob condições de déficit hídrico, e os resultados encontrados foram promissores, concluindo que estes nanomateriais são capazes de reduzir os efeitos deletérios causados pela seca, possivelmente em função do aumento no teor de prolina, de pigmentos fotossintéticos e aumento da atividade de enzimas antioxidantes. Além de ajudarem na recuperação da planta, estes nanomateriais beneficiaram o seu crescimento e estimularam a produção destes bioativos tão importantes (ALI et al., 2021).

Por fim, por nanotecnologia, pode-se revestir substâncias instáveis ou sensíveis à fotossensibilidade, como os doadores de óxido nítrico (NO), evitando sua degradação e permitindo sua entrega sustentada. Pesquisa realizada por SILVEIRA et al. (2021) identificou que o encapsulamento com quitosana de 100  $\mu\text{M}$  dos seguintes doadores de NO: *S*-nitrosoglutationa (GSNO); *S*-nitroso-*N*-acetilcisteína (SNAC), melhorou a tolerância ao estresse hídrico em Plantas de cana-de-açúcar, a partir do aumento na assimilação de  $\text{CO}_2$  foliar, da atividade fotossintética, da atividade da rubisco, e da atividade antioxidante.

### Nanomateriais e quebra da dormência de sementes

A aplicação de nanomateriais na agricultura também pode ser feita melhorando parâmetros correlatos à germinação de sementes. Pesquisadores

sugerem que o processo envolvido na estimulação da germinação das sementes correlaciona-se à formação de novos poros em seu tegumento, aumentando a permeabilidade, o que melhora a absorção de água. Outro fator pode estar relacionado à produção de EROs, que são compostos que, em níveis adequados, participam da quebra da dormência através da oxidação de lipídios, de proteínas de armazenamento e de ácidos nucleicos responsáveis pela codificação de genes de dormência, o que contribui para a diminuição na síntese de ácido abscísico (ABA), indução do processo de produção de giberelina (GA) e formação de metabólitos secundários que aumentam a resistência das sementes ao ambiente em condições de estresse (EL-BADRI et al., 2021; RAI-KALAL; TOMAR; JAJOO, 2021). O processo de dormência da semente é regulado pelo equilíbrio entre dois fitohormônios, GA e ABA.

Nesta perspectiva de atuação sobre germinação de sementes, diversos estudos comprovam a eficiência de nanomateriais em decorrência de promover algumas das ações fisiológicas mencionadas. Alguns nanomateriais têm sido utilizados para o pré-tratamento de sementes através da técnica de *nanopriming*, onde realiza-se a embebição delas em solução contendo o nanomaterial, a fim de aumentar a taxa de germinação (HATAMI et al., 2021).

Estudo realizado por EL-BADRI et al. (2021) identificou, após 24h do *nanopriming* de sementes de colza com nanopartículas de 150 mg L<sup>-1</sup> de selênio (SeNPs) e 100 mg L<sup>-1</sup> de óxido de zinco (ZnONPs), que essas nanopartículas eram capazes de modular a expressão de genes que controlam a concentração desses fitohormônios, o que resultou na diminuição da concentração de ABA e no aumento de GA, o que favorece o processo de germinação. O *nanopriming* se mostrou mais eficiente que o *hidropriming*, em razão da alta capacidade de penetração no nanomaterial no tegumento da semente, o que provoca aumento da permeabilidade e inicia o processo de germinação. Além disso, estes nanomateriais elevaram os níveis de compostos antioxidantes, o que beneficiou o sistema de defesa da planta que se tornou mais tolerante ao estresse salino.

O preparo de sementes antes da sementeira é uma técnica importante para superar a dormência que normalmente ocorre em sementes armazenadas por um longo período, sendo muito utilizada para aprimorar os índices de germinação (SHARMA; AFZAL; SINGH, 2021). O *nanopriming* de sementes tem ganhado destaque frente a outras técnicas de condicionamento em razão da baixa quantidade de nanomateriais utilizados, da menor quantidade de resíduos produzidos e, em razão do aumento substancial que tem gerado nos índices de germinação (HATAMI et al., 2021).

Esta técnica pode se tornar um grande avanço para promoção da melhoria da produtividade e sustentabilidade agrícola (HATAMI et al., 2021; SHARMA; AFZAL; SINGH, 2021), fato que pode ser evidenciado com sua aplicação em sementes mais velhas, as quais não apresentam a quantidade mínima de água necessária para iniciar o processo de germinação e, com o *nanopriming*, aumentam significativamente a absorção de água, (SHARMA; AFZAL; SINGH, 2021). Estudo realizado por HATAMI et al. (2021), sugere que o aumento na porosidade do tegumento influi diretamente no processo de germinação. Os autores observaram que sementes de erva-cidreira (*Melissa officinalis* L.) tratadas com 500 mg L<sup>-1</sup> de nanopartículas de silício (n Si) apresentavam alto grau de porosidade em sua superfície, o que aumentou a permeabilidade, afrouxou o tegumento e induziu sua germinação.

Aplicação de 20 mg L<sup>-1</sup> de nanopartículas de óxido de zinco (NPs de ZnO) em sementes envelhecidas de arroz (*Oryza sativa*), mostrou maior eficiência em estimular a germinação, comparativamente aos tratamentos convencionais, em razão da maior absorção de água e alta atividade enzimática, tendo melhorias em parâmetros como aumento no peso seco e no comprimento de radícula (SHARMA; AFZAL; SINGH, 2021).

Outra pesquisa complementa este raciocínio, explicando que o mecanismo de modulação de genes de expressão, que resulta na regulação desses fitohormônios, ocorre através da geração de ERO provocada pelo *nanoprimering*. Sementes de trigo (*Triticum aestivum* L.) tratadas com nanopartículas de óxido de zinco (NPs de ZnO) a 10 mg L<sup>-1</sup> apresentaram, após embebição de 12h, aumento significativo na produção de peróxido de hidrogênio. O grande aumento no número de poros na superfície do tegumento, aumentou a absorção de água e deu início à respiração oxidativa, o que explica a formação de espécies reativas de oxigênio. A princípio são formados os radicais superóxidos, que são transformados pela enzima superóxido dismutase (SOD) em peróxido de hidrogênio, que funcionará como um sinalizador e estimulará a síntese de GA, que será responsável tanto pelo afrouxamento do tegumento como pela quebra da dormência da semente, através da hidrólise do amido e ativação da  $\alpha$ -amilase, como suporte ao crescimento do embrião. Os níveis de peróxido de hidrogênio se mantêm em níveis adequados, dentro da janela oxidativa, em função do aumento da atividade da catalase (CAT), que decompõe esse radical em água e oxigênio. O benefício do *nanoprimering* se estendeu às mudas, que passaram a apresentar maior tolerância ao estresse hídrico, em razão da menor degradação de clorofila e do aumento do desempenho fotossintético (RAI-KALAL; TOMAR; JAJOO, 2021).

Por fim, a geração de EROs, associado ao mecanismo de manutenção destes em níveis adequados, foram observados e associados à aplicação de nanopartículas de ferro zero-valente (G-nZVI) na concentração de 80 mg L<sup>-1</sup> utilizando-se da técnica do *nanoprimering* em sementes de arroz (*Oryza sativa* L.). Os resultados confirmaram elevação na taxa de germinação em 1,23 vezes e na capacidade de retenção de água em 2,7 vezes. O *nanoprimering* ainda resultou em maior rendimento da colheita, sendo 1,53 vezes maior que a obtida com as sementes que receberam *hidropriming* (GUHA et al., 2021).

### Nanomateriais como nanossensores de uso na agricultura

O uso de nanomateriais, especialmente os do tipo 2D, para a fabricação de sensores agrícolas, tem ganhado notoriedade na agricultura de precisão, em razão das propriedades exclusivas que esses materiais apresentam em nanoescala. O emprego de nanossensores favorecem as práticas de manejo, tanto na promoção de maior agilidade nas tomadas de decisão, como na qualidade da ação, pois permitem a detecção prévia de diversos parâmetros ambientais e da própria planta que poderiam afetar seu crescimento e rendimento (KHASIM et al., 2023).

Os nanossensores são utilizados, por exemplo, para a detecção de espécies reativas de oxigênio e monitoramento dos níveis de óxido nítrico (NO) e íons de cálcio (Ca<sup>2+</sup>), permitindo que o estresse sofrido pelas plantas seja detectado

precocemente (WU; LI, 2022). Nanossensores também permitem acompanhar e controlar os níveis de nutrientes, hormônios, reguladores de crescimento, metabólitos secundários e agroquímicos presentes nas plantas, além do monitoramento da qualidade do solo (SINGHAL; VERMA; KUMAR, 2022).

Nanopartículas de platina e nanofolhas de grafeno foram eficientes no diagnóstico precoce de estresse vegetal quando testadas no monitoramento dos níveis de  $H_2O_2$  em tomateiros (ZHANG et al., 2024).

O nitreto de carbono grafítico ( $g-C_3N_4$ ) é um nanomaterial semicondutor 2D, de alta estabilidade química e térmica, com capacidade de conversão optoeletrônica e excelente biocompatibilidade, que os tornam candidatos promissores para esse tipo de aplicação (KHASIM et al., 2023).  $g-C_3N_4$  dopados com nanopartículas de cobre e óxido de ferro foram utilizados para a fabricação de nanossensores e testados na detecção de gás metano e umidade no solo. Os resultados mostraram maior sensibilidade de detecção, melhor condutividade elétrica, menor tempo de resposta, e maior estabilidade que o modelo tradicional (KHASIM et al., 2023).

Em função da propriedade fotocatalítica e do tamanho extremamente reduzido que apresentam, os nanotubos de carbono também se destacam para esse tipo de aplicação, pois estas características permitem testes de detecção elétrica, e em razão da maior relação superfície-volume, melhoram a interação com as moléculas (MAJEED et al., 2020).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os nanomateriais, pelas suas propriedades inovadoras intrínsecas, têm sido empregados em diversos setores da agricultura, apresentando potencialidades diversas e variadas, demonstrando superioridade em relação aos seus equivalentes químicos tradicionais empregados neste setor. Ademais, suas ações contribuem para o manejo adequado da cultura em tempo hábil, evitando prejuízos advindos de fatores de estresse, promovendo maior impacto na produtividade e na síntese de fitoquímicos, sendo alternativa economicamente positiva pela possibilidade de utilização de quantitativo menor em comparação aos agroquímicos usuais, gerando menor desperdício de produtos. Por fim, estes compostos destacam-se pela abordagem mais segura ao ambiente e ao ser humano, decorrente de melhor uso pela planta, contribuindo para a economia circular do setor. Dada a sua potencialidade, a exploração desses nanomateriais promete revolucionar a agricultura e impulsionar pesquisas para ampliar e aprimorar suas aplicabilidades, bem como sua segurança de aplicação.

# Maximizing agricultural potentials with nanotechnology: applications and benefits

## ABSTRACT

The use of nanomaterials in precision agriculture aims to replace conventional products, as they offer a more sustainable and efficient alternative, requiring lower application doses. This approach presents a promising strategy for addressing the predicted population increase of more than 25% by 2050, which will necessitate higher agricultural productivity. Increased productivity, in turn, implies greater consumption of natural resources and higher agrochemical application rates. Under conventional practices, this scenario heightens the risk of environmental contamination, which, when coupled with ongoing climate change, poses a potential threat to the survival of certain plant species, including those of pharmacological importance. Nanomaterials serve various functions, including: nanofertilizers, which, due to their extremely small size and enhanced surface area, facilitate improved distribution and absorption; nanocarriers for complex substances or those prone to degradation from environmental factors such as heat and light, enabling controlled release, reducing losses, and minimizing environmental accumulation; and the elicitation of bioactive compounds mediated by the photocatalytic properties of specific nanomaterials. These bioactive compounds are closely linked to plant stress tolerance and seed germination and play a crucial role in the pharmacological potential of certain plants, despite their limited natural production. Thus, nanomaterials represent an invaluable resource, particularly in the cultivation of medicinal plants, which have gained popularity in recent years due to their natural benefits and low toxicity. This narrative review explores the current applications and advantages of nanomaterials in agriculture, with a specific focus on medicinal plants.

## REFERÊNCIAS

AHAMAD, L. et al. Exploring the nano-fungicidal efficacy of green synthesized magnesium oxide nanoparticles (MgO NPs) on the development, physiology, and infection of carrot (*Daucus carota* L.) with *Alternaria* leaf blight (ALB): Molecular docking. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 22, n. 10, p. 3069–3080, 1 out. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.02.034>>. Acesso em: 08/10/2024.

ALI, E. F. et al. A vital role of chitosan nanoparticles in improvisation the drought stress tolerance in *Catharanthus roseus* (L.) through biochemical and gene expression modulation. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 161, p. 166–175, 1 abr. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.008>>. Acesso em: 08/10/2024.

BEGUM, S. et al. Comparative analysis of the effects of chemically and biologically synthesized silver nanoparticles on biomass accumulation and secondary metabolism in callus cultures of *Fagonia indica*. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 26, n. 8, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12298-020-00851-w>>. Acesso em: 08/10/2024.

BERNELA, M. et al. Harnessing the potential of nanobiotechnology in medicinal plants. **Industrial Crops and Products**, v. 194, p. 116266, 1 abr. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116266>>. Acesso em: 08/10/2024.

CHANDRASHEKAR, H. K. et al. Nanoparticle-mediated amelioration of drought stress in plants: a systematic review. **3 Biotech**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13205-023-03751-4>>. Acesso em: 08/10/2024.

EL-ABEID, S. E. et al. Antifungal activity of copper oxide nanoparticles derived from *Zizyphus spina* leaf extract against *Fusarium* root rot disease in tomato plants. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 22, n. 1, p. 28, 12 jan. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s12951-023-02281-8>>. Acesso em: 08/10/2024.

EL-BADRI, A. M. et al. Selenium and zinc oxide nanoparticles modulate the molecular and morpho-physiological processes during seed germination of *Brassica napus* under salt stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 225, p. 112695, 1 dez. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112695>>. Acesso em: 08/10/2024.

ELSAIED, A. A. A. et al. Hydroxyapatite nanoparticles as novel nano-fertilizer for production of rosemary plants. **Scientia Horticulturae**, v. 295, p. 110851, 15 mar.

---

2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110851>>. Acesso em: 08/10/2024.

GHORBANPOUR, M.; KHALTABADI FARAHANI, A. H.; HADIAN, J. Potential toxicity of nano-graphene oxide on callus cell of *Plantago major* L. under polyethylene glycol-induced dehydration. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 148, n. August 2017, p. 910–922, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.061>>. Acesso em: 08/10/2024.

GUHA, T. et al. Nanopriming with zero-valent iron synthesized using pomegranate peel waste: A “green” approach for yield enhancement in *Oryza sativa* L. cv. Gonindobhog. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 163, p. 261–275, 1 jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.006>>. Acesso em: 08/10/2024.

HATAMI, M. et al. Silicon nanoparticle-mediated seed priming and *Pseudomonas* spp. inoculation augment growth, physiology and antioxidant metabolic status in *Melissa officinalis* L. plants. **Industrial Crops and Products**, v. 162, p. 113238, 1 abr. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113238>>. Acesso em: 08/10/2024.

KHASIM, S. et al. Design and development of multi-functional graphitic carbon nitride heterostructures embedded with copper and iron oxide nanoparticles as versatile sensing platforms for environmental and agricultural applications. **Ceramics International**, v. 49, n. 12, p. 20688–20698, 15 jun. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.200>>. Acesso em: 08/10/2024.

LI, X.; LIU, J. Soil amendments with nanoparticles control cucumber wilt caused by *Fusarium oxysporium*. **South African Journal of Botany**, v. 168, p. 384–393, 1 maio 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.03.034>>. Acesso em: 08/10/2024.

MAJEED, N. et al. Application of carbon nanomaterials in plant biotechnology. **Materials Today: Proceedings**, v. 30, p. 340–345, 1 jan. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.618>>. Acesso em: 08/10/2024.

NEKOUKHO, M. et al. Improved efficacy of foliar application of zinc oxide nanoparticles on zinc biofortification, primary productivity and secondary metabolite production in dragonhead. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, p. 134803, 15 dez. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.053>>. Acesso em: 08/10/2024.

NOUROZI, E. et al. Pharmaceutical important phenolic compounds overproduction and gene expression analysis in *Dracocephalum kotschyi* hairy

---

roots elicited by SiO<sub>2</sub> nanoparticles. **Industrial Crops and Products**, v. 133, p. 435–446, 1 jul. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.053>>. Acesso em: 08/10/2024.

PARAGUAY-DELGADO, F. et al. Photocatalytic properties of Cu-containing ZnO nanoparticles and their antifungal activity against agriculture-pathogenic fungus. **RSC Advances**, v. 12, n. 16, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1039/D2RA00863G>>. Acesso em: 08/10/2024.

RAHMANI, N.; RADJABIAN, T.; SOLTANI, B. M. Impacts of foliar exposure to multi-walled carbon nanotubes on physiological and molecular traits of *Salvia verticillata* L., as a medicinal plant. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 150, p. 27–38, 1 maio 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.022>>. Acesso em: 08/10/2024.

RAI-KALAL, P.; TOMAR, R. S.; JAJOO, A. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> signaling regulates seed germination in ZnO nanoprimed wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds for improving plant performance under drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 189, p. 104561, 1 set. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104561>>. Acesso em: 08/10/2024.

RAMACHANDRAIAH, K.; HONG, G. P. Polymeric nanomaterials for the development of sustainable plant food value chains. **Food Bioscience**, v. 41, p. 100978, 1 jun. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100978>>. Acesso em: 08/10/2024.

ROSSI, L. et al. Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 135, p. 160–166, 1 fev. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.12.005>>. Acesso em: 08/10/2024.

SAMADI, S. et al. Single-wall carbon nano tubes (SWCNTs) penetrate *Thymus daenensis* Celak. plant cells and increase secondary metabolite accumulation in vitro. **Industrial Crops and Products**, v. 165, p. 113424, 1 jul. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113424>>. Acesso em: 08/10/2024.

SAMADI, S. et al. Exploring potential of multi-walled carbon nanotubes to establish efficient callogenesis, elicitation of phenolic compounds and antioxidative activities in thyme plants (*Thymus daenensis*): An in vitro assay. **South African Journal of Botany**, v. 157, p. 602–613, 1 jun. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.04.041>>. Acesso em: 08/10/2024.

SHARMA, D.; AFZAL, S.; SINGH, N. K. Nanopriming with phytosynthesized zinc oxide nanoparticles for promoting germination and starch metabolism in rice

---

seeds. **Journal of Biotechnology**, v. 336, p. 64–75, 10 ago. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.06.014>>. Acesso em: 08/10/2024.

SILVEIRA, N. M. et al. Chitosan-encapsulated nitric oxide donors enhance physiological recovery of sugarcane plants after water deficit. **Environmental and Experimental Botany**, v. 190, p. 104593, 1 out. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104593>>. Acesso em: 08/10/2024.

SINGHAL, J.; VERMA, S.; KUMAR, S. The physio-chemical properties and applications of 2D nanomaterials in agricultural and environmental sustainability. **Science of The Total Environment**, v. 837, p. 155669, 1 set. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155669>>. Acesso em: 08/10/2024.

SOTOODEHNIA-KORANI, S. et al. Selenium nanoparticles induced variations in growth, morphology, anatomy, biochemistry, gene expression, and epigenetic DNA methylation in *Capsicum annum*; an in vitro study. **Environmental Pollution**, v. 265, p. 114727, 1 out. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114727>>. Acesso em: 08/10/2024.

TIAN, H.; GHORBANPOUR, M.; KARIMAN, K. Manganese oxide nanoparticle-induced changes in growth, redox reactions and elicitation of antioxidant metabolites in deadly nightshade (*Atropa belladonna* L.). **Industrial Crops and Products**, v. 126, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.042>>. Acesso em: 08/10/2024.

WU, H.; LI, Z. Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performance. **The Crop Journal**, v. 10, n. 1, p. 1–12, 1 fev. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.06.002>>. Acesso em: 08/10/2024.

ZHANG, C. et al. An Implantable and Self-Powered Sensing System for the In Vivo Monitoring of Dynamic H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Level in Plants. **Engineering**, 21 fev. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.11.021>>. Acesso em: 08/10/2024.

**Recebido:** 19/10/2024

**Aprovado:** 05/04/2025

**DOI:** 10.3895/rts.v21n63.19329

**Como citar:**

SILVA, Thais Dias e; SILVA, Thiago Dias e; SILVA, Ribas Antônio da; et al. Maximizando potenciais agrícolas com nanotecnologia: aplicações e benefícios. **Rev. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 21, n. 63, p.249-270, jan./mar., 2025. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/19329>

Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

**Direito autorial:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

