



INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

BACHARELADO EM AGRONOMIA

**NANOTECNOLOGIA APLICADA À SOJA: POTENCIAL FUNCIONAL
DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO) E FERRO (Fe₂O₃)
- UMA REVISÃO DE ESCOPO**

JOSIEL FERREIRA LIMA

Rio Verde - GO

2026



BACHARELADO EM AGRONOMIA

NANOTECNOLOGIA APLICADA À SOJA: POTENCIAL FUNCIONAL DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO) E FERRO (Fe₂O₃) - UMA REVISÃO DE ESCOPO

JOSIEL FERREIRA LIMA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alan Carlos da Costa

Rio Verde - GO

2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

L732n Lima, Josiel Ferreira
Nanotecnologia aplicada à soja: potencial funcional de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e ferro (Fe_3O_4) – Uma revisão de escopo / Josiel Ferreira Lima. Rio Verde 2026.
77f. il.
Orientador: Prof. Dr. Alan Carlos da Costa.
Monografia (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 - Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio Verde).
1. Glycine max. 2. Nanopartículas. 3. Óxidos metálicos. 4. Fitotoxicidade. 5. Produtividade. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese (doutorado) | ☐ Artigo científico |
| ☐ Dissertação (mestrado) | ☐ Capítulo de livro |
| ☐ Monografia (especialização) | ☐ Livro |
| ☒ TCC (graduação) | ☐ Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Josiel Ferreira Lima

Matrícula:

2021102200240130

Título do trabalho:

Nanotecnologia aplicada à soja: Potencial funcional de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e ferro (FeO) - Uma revisão de escopo

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente



JOSIEL FERREIRA LIMA

Data: 25/03/2026 09:50:48-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde - Go

Local

25 / 02 / 2026

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente



ALAN CARLOS DA COSTA

Data: 25/03/2026 10:02:06-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 2/2026 - PROPPI-REI/IFGOIANO

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 04 dias do mês de março de dois mil e vinte e seis, às 14h00, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos membros prof. Alan Carlos da Costa (orientador), pesquisador Dr. Adinan Alves da Silva (membro interno), pesquisadora Dra Luciana Minervina de Freitas Moura (membro interno) e pesquisadora Dra Caroline Müller (membro interno), para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado "Nanotecnologia aplicada à soja: Potencial funcional de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e ferro (Fe₂O₃) - Uma revisão de escopo" de **Josiel Ferreira Lima**, estudante do curso de Bacharel em Agronomia do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2021102200240130. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.

Rio Verde, 04 de março de 2026.

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Alan Carlos da Costa

Orientador – presidente da banca

(Assinado Eletronicamente)

Dr. Adinan Alves da Silva

Membro da Banca Examinadora

(Assinado Eletronicamente)

Dra. Luciana Minervina de Freitas Moura

Membro da Banca Examinadora

(Assinado Eletronicamente)

Dra. Caroline Müller

Membro da Banca Examinadora

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alan Carlos da Costa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 04/03/2026 16:37:32.
- **Adinan Alves da Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 04/03/2026 16:37:59.
- **Luciana Minervina de Freitas Moura**, 2022202344060003 - Discente, em 04/03/2026 16:39:12.
- **Caroline Muller Amaral**, 2024202344060001 - Discente, em 04/03/2026 18:50:24.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 04/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 795974

Código de Autenticação: f53b8ea1f1



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Reitoria

Rua 88, 310, Setor Sul, GOIANIA / GO, CEP 74.085-010

*Dedico esta pesquisa aos meus pais, por tudo.
Vocês me ensinaram, na prática, o que é
esforço, responsabilidade e persistência. Se
hoje cheguei até aqui, foi porque vocês nunca
soltaram minha mão.*

*À minha avó, com carinho e saudade. Nunca a
esquecerei.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e pela força ao longo desta jornada acadêmica.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, pela formação acadêmica e pelas oportunidades proporcionadas durante o curso de Bacharelado em Agronomia.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alan Carlos da Costa, pela confiança, orientação e apoio na elaboração deste Trabalho de Curso.

Ao Laboratório de Ecofisiologia e Produtividade Vegetal, pelo suporte acadêmico e científico.

À minha família, pelo incentivo constante e por sempre acreditarem em mim.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

LIMA, Josiel Ferreira. **Nanotecnologia aplicada à soja: potencial funcional de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e ferro (Fe₂O₃) – Uma revisão de escopo.** 2026. 77p. Monografia (Curso de Bacharelado em Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026.

A aplicação de nanopartículas na agricultura tem sido investigada como estratégia para otimizar a eficiência nutricional e mitigar estresses em culturas de interesse econômico. Na soja (*Glycine max* L.), nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de ferro (Fe₂O₃) têm sido associadas tanto a efeitos benéficos quanto a respostas fitotóxicas, dependendo das condições experimentais. Este estudo consistiu em uma revisão de escopo, conduzida conforme as diretrizes do Joanna Briggs Institute e relatada segundo o PRISMA-ScR, com protocolo registrado na Open Science Framework (DOI 10.17605/OSF.IO/BYDSJ). A busca realizada nas bases Web of Science, Scopus e BDTD resultou em 275 registros, dos quais 29 estudos atenderam integralmente aos critérios de elegibilidade baseados na estratégia PCC. A análise evidenciou que os efeitos das nanopartículas são predominantemente dose-dependentes. Em concentrações baixas a moderadas, observou-se incremento de biomassa, atividade fotossintética, modulação do sistema antioxidante e aumento de produtividade. Em contrapartida, doses elevadas estiveram associadas a estresse oxidativo, redução de pigmentos fotossintéticos, comprometimento da fixação biológica de nitrogênio e prejuízos reprodutivos. A transição entre resposta adaptativa e fitotoxicidade mostrou-se condicionada principalmente à dose, via de aplicação e propriedades físico-químicas das nanopartículas. Com base nos achados, propõem-se critérios integrados para diferenciar efeitos nutricionais de efeitos indutores de estresse, contribuindo para interpretação mais consistente da literatura e para o uso racional desses nanomateriais na cultura da soja.

Palavras-chave: *Glycine max*; nanopartículas; óxidos metálicos; fitotoxicidade; produtividade.

ABSTRACT

LIMA, Josiel Ferreira. **Nanotechnology applied to soybean: functional potential of zinc oxide (ZnO) and iron (Fe₂O₃) nanoparticles – A scoping review.** 2026. 77p. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Agronomy). Federal Institute of Education, Science and Technology Goiano – Rio Verde Campus, Rio Verde, GO, Brazil, 2026.

The application of nanoparticles in agriculture has been investigated as a strategy to optimize nutritional efficiency and mitigate stress in economically important crops. In soybean (*Glycine max* L.), zinc oxide (ZnO) and iron oxide (Fe₂O₃) nanoparticles have been associated with both beneficial effects and phytotoxic responses, depending on experimental conditions. This study consisted of a scoping review, conducted according to the Joanna Briggs Institute guidelines and reported following the PRISMA-ScR checklist, with a protocol registered on the Open Science Framework (DOI 10.17605/OSF.IO/BYDSJ). The search was performed in Web of Science, Scopus, and the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations (BDTD), resulting in 275 records, of which 29 studies fully met the eligibility criteria based on the PCC strategy. The analysis showed that the effects of nanoparticles are predominantly dose-dependent. At low to moderate concentrations, increases in biomass, photosynthetic activity, modulation of the antioxidant system, and productivity gains were observed. In contrast, high doses were associated with oxidative stress, reduction of photosynthetic pigments, impairment of biological nitrogen fixation, and reproductive damage. The transition between adaptive response and phytotoxicity was mainly conditioned by dose, application route, and physicochemical properties of the nanoparticles. Based on the findings, integrated criteria are proposed to differentiate nutritional effects from stress-inducing effects, contributing to a more consistent interpretation of the literature and to the rational use of these nanomaterials in soybean cultivation.

Keywords: *Glycine max*; nanoparticles; metal oxides; phytotoxicity; productivity.

LISTA DE ABREVIACÕES

APX	–	Ascorbato peroxidase
BDTD	–	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
BNF	–	Fixação Biológica de Nitrogênio
CAT	–	Catalase
CeO ₂	–	Óxido de Cério
DAS	–	Dias Após a Semeadura
DLS	–	Dynamic Light Scattering
D _h	–	Tamanho hidrodinâmico
DNA	–	Ácido Desoxirribonucleico
EDTA	–	Ácido Etilenodiamino Tetra-acético
ETc	–	Evapotranspiração da Cultura
Fe ₂ O ₃	–	Óxido de Ferro
GPX	–	Glutathione Peroxidase
H ₂ O ₂	–	Peróxido de Hidrogênio
JBIC	–	Joanna Briggs Institute
ISO	–	International Organization for Standardization
MDA	–	Malondialdeído
NP	–	Nanopartícula
NPs	–	Nanopartículas
OSF	–	Open Science Framework
PCC	–	População, Conceito e Contexto
PMS	–	Peso de Mil Sementes
PRISMA	–	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
POX	–	Peroxidase
POD	–	Peroxidase
ROS	–	Espécies Reativas de Oxigênio
SDS	–	Síndrome da Morte Súbita
SEM	–	Microscopia Eletrônica de Varredura
SOD	–	Superóxido Dismutase
TEM	–	Microscopia Eletrônica de Transmissão
ZnO	–	Óxido de Zinco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tamanho comparativo de 1 nm.....	18
Figura 2 - Aumento da área de superfície pelo aumento da divisão.	18
Figura 3. Técnicas de síntese “top-down” ou “bottom-up.”	21
Figura 4. Ilustração esquemática do processo de formação de diferentes nanoestruturas de ZnO.....	23
Figura 5. Representação esquemática das vias de absorção A (Foliar) e B (Radicular) para nanopartículas de ZnO e Fe ₂ O ₃	26
Figura 6. Fluxograma do processo de identificação, triagem e seleção dos estudos incluídos na revisão de escopo.	40
Figura 7. Distribuição temporal dos estudos incluídos (n=29).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aumento da área de superfície pelo aumento da divisão.....	18
Tabela 2 - Área final em unidades do cotidiano (equivalente a 6 000 m ²).	19
Tabela 3: Barreiras Biológicas e Limites de Exclusão de Tamanho (SEL) para Nanopartículas	27
Tabela 4. Critérios de elegibilidade.	39
Tabela 5. Tamanho e tipo de nanopartículas encontrados nos estudos analisados	42
Tabela 6. Método de síntese a caracterização das nanopartículas encontrados nos estudos. ...	44
Tabela 7. Condições experimentais e estágio fenológico dos estudos analisados	46
Tabela 8. Matriz conceitual: classificação da dualidade funcional (≤ 100 nm).....	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Fundamentos da nanotecnologia	17
2.1.1. Escala nanométrica e propriedades emergentes	17
2.1.2. Fundamentos	19
2.1.3. Nanotecnologia no contexto brasileiro	20
2.2. Síntese de nanopartículas.....	20
2.2.1. Abordagens top-down e bottom-up	20
2.2.2. Métodos químicos e biológicos (síntese verde)	21
2.2.3. Controle morfológico: pH e nanoflores de ZnO (Mayrinck et al., 2014).....	22
2.3. Caracterização de nanopartículas.....	24
2.4. Interação nanopartícula-planta.....	25
2.4.1. Vias de absorção e barreiras biológicas	25
2.4.2. Translocação sistêmica e homeostase metálica	28
3.4.3. Destino subcelular: dissolução, liberação iônica, compartimentalização e limites da homeostase.....	29
2.5. Nanopartículas de ZnO em soja	30
2.5.1. Efeitos nutricionais e bioestimulantes.....	30
2.5.2. Morfologia e funcionalidade: nanoflores.....	30
2.5.3. Respostas sob estresse abiótico (déficit hídrico)	31
2.5.4. Sanidade de sementes e atividade antifúngica	31
2.5.5. Fitotoxicidade em doses elevadas	31
2.6. Nanopartículas de Fe₂O₃ em soja	32
2.6.1. Biofortificação e eficiência fotossintética	32
2.6.2. Controle de patógenos radiculares (<i>Fusarium oxysporum</i>)	33
2.6.3. Síntese verde e controle de <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	33
2.6.4. Potencial pró-oxidante e reação de Fenton	34
2.7. Hormese e dualidade funcional	35
2.7.1. Fundamentos da resposta bifásica	35
2.7.2. Biomarcadores, limiares críticos e modulação ambiental.....	36
3 OBJETIVOS	38

3.1 Objetivo Geral.....	38
3.2 Objetivos Específicos	38
4 METODOLOGIA.....	38
5 RESULTADOS.....	41
5.1 Caracterização metodológica dos estudos incluídos.....	41
5.1.1 Distribuição temporal das publicações	41
5.1.2 Tipo e tamanho das nanopartículas utilizadas.....	42
5.1.3 Origem, método de síntese e caracterização físico-química das nanopartículas	44
5.1.5 Condições experimentais e estágio fenológico.....	45
5.2 Efeitos das nanopartículas no desenvolvimento e na fisiologia da soja	47
5.3 Efeitos das nanopartículas sob condições de estresse abiótico	50
5.3.1 Estresse por metais pesados (As, Cr e Cd)	50
5.3.2 Estresse hídrico	51
5.3.3 Estresse biótico.....	52
5.3.4 Alterações na microbiota do solo e efeitos ecológicos	53
6 DISCUSSÃO	53
6.1 Tendência geral das respostas fisiológicas à aplicação de nanopartículas	53
6.2 Modulação do sistema antioxidante e equilíbrio redox.....	55
6.3 Fotossíntese, eficiência do aparato fotossintético e implicações produtivas.....	56
6.4 Sistema radicular, arquitetura de raízes e absorção de nutrientes	58
6.5 Interação com nodulação, fixação biológica de nitrogênio e microbiota associada ...	59
6.6 Biofortificação, qualidade nutricional e riscos de bioacumulação.....	61
6.7 Limitações metodológicas da literatura e implicações para aplicação em campo.....	62
6.8 Síntese integrativa e perspectivas para pesquisas futuras	63
7 CONCLUSÃO.....	67
8 REFERÊNCIAS.....	68
ANEXO – REGISTRO DO PROTOCOLO NA OSF: DOI 10.17605/OSF.IO/BYDSJ.....	6

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) constitui uma das principais culturas agrícolas do mundo, desempenhando papel estratégico na produção de proteína vegetal, óleo comestível e insumos para cadeias produtivas de alimentos, ração animal e biocombustíveis. No Brasil, a cultura ocupa posição de destaque tanto em área cultivada quanto em relevância econômica, sendo fortemente dependente de manejo nutricional eficiente e estabilidade fisiológica frente a estresses ambientais.

O desempenho produtivo da soja está diretamente relacionado ao adequado suprimento de micronutrientes, entre os quais se destacam o zinco e o ferro. O zinco participa da regulação enzimática, da integridade de membranas e da expressão gênica, enquanto o ferro é essencial para a síntese de clorofila, transporte de elétrons na fotossíntese e fixação biológica de nitrogênio. Deficiências desses elementos comprometem a taxa fotossintética, o desenvolvimento radicular, a formação de nódulos e, consequentemente, o rendimento de grãos.

Nesse contexto, a nanotecnologia tem emergido como alternativa promissora para otimizar a eficiência de fertilizantes e reduzir perdas por lixiviação, imobilização ou baixa disponibilidade no solo. Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de ferro (Fe₂O₃) vêm sendo estudadas como potenciais nanofertilizantes devido à sua elevada área superficial, maior reatividade e possibilidade de aplicação em menores doses quando comparadas às fontes convencionais.

Entretanto, a literatura científica revela uma dualidade funcional desses nanomateriais. Em determinadas concentrações e condições experimentais, observam-se aumentos na germinação, biomassa, atividade fotossintética e produtividade. Por outro lado, em doses elevadas ou sob determinadas formas físico-químicas, as mesmas nanopartículas podem induzir estresse oxidativo, peroxidação lipídica, alterações na fixação biológica de nitrogênio e prejuízos reprodutivos.

Essa variabilidade de respostas está associada a múltiplos fatores, incluindo tamanho da partícula, método de síntese, revestimentos superficiais, via de aplicação, interação com microbiota do solo e estágio fenológico da planta. A ausência de padronização nos delineamentos experimentais e a diversidade de parâmetros avaliados dificultam a consolidação de critérios claros que permitam diferenciar efeitos nutricionais de efeitos fitotóxicos.

Diante desse cenário, torna-se necessário organizar criticamente a produção científica disponível, identificando padrões de resposta fisiológica e agrônômica que contribuam para

estabelecer limites seguros de aplicação e diretrizes para o uso sustentável de nanopartículas na cultura da soja.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo mapear e sistematizar as evidências científicas acerca dos efeitos de nanopartículas de óxido de zinco e óxido de ferro na soja, analisando sua dupla funcionalidade sob a perspectiva fisiológica e produtiva, com vistas a contribuir para o manejo racional desses nanomateriais na agricultura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos da nanotecnologia

2.1.1. Escala nanométrica e propriedades emergentes

A escala nanométrica, fundamental para aplicações industriais, é frequentemente ilustrada pela sua dimensão extremamente reduzida. Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2011), um nanômetro (1 nm) corresponde a cerca de 70.000 vezes menor que o diâmetro de um fio de cabelo humano. Essa desproporção dimensional evidencia a complexidade do campo, que, por operar em uma escala invisível a olho nu, exige instrumentação científica avançada tanto para a observação quanto para a manipulação da matéria. A relevância dessa escala reduzida para a agricultura reside na superação de barreiras biológicas. Conforme destacam Siddiqi e Husen (2017), a parede celular vegetal funciona como um filtro seletivo, possuindo um diâmetro de poro (limite de exclusão) que varia tipicamente entre 5 e 20 nm. Dessa forma, nanopartículas de óxidos metálicos projetadas dentro deste intervalo dimensional apresentam uma vantagem cinética significativa, permitindo a passagem pela malha de microfibrilas de celulose e alcançando a membrana plasmática com maior facilidade em comparação aos fertilizantes iônicos convencionais, que dependem exclusivamente de transportadores de membrana.

Do ponto de vista conceitual, a nanotecnologia baseia-se na manipulação de materiais em escala nanométrica, geralmente entre 1 e 100 nm. Para fins de compreensão, destaca-se que 1 nanômetro corresponde a um bilionésimo de metro, dimensão significativamente inferior à de estruturas celulares vegetais. Essa escala confere aos nanomateriais uma área superficial específica muito superior à de partículas maiores, favorecendo reações químicas e interações com sistemas biológicos. A Figura 1 ilustra o tamanho comparativo de 1 nm, enquanto a Figura 2 demonstra o aumento da área de superfície decorrente da divisão progressiva de partículas,

conforme apresentado na norma técnica ISO/TR 18401. As tabelas 1 e 2 mostram a dimensão e cobertura dessas áreas.

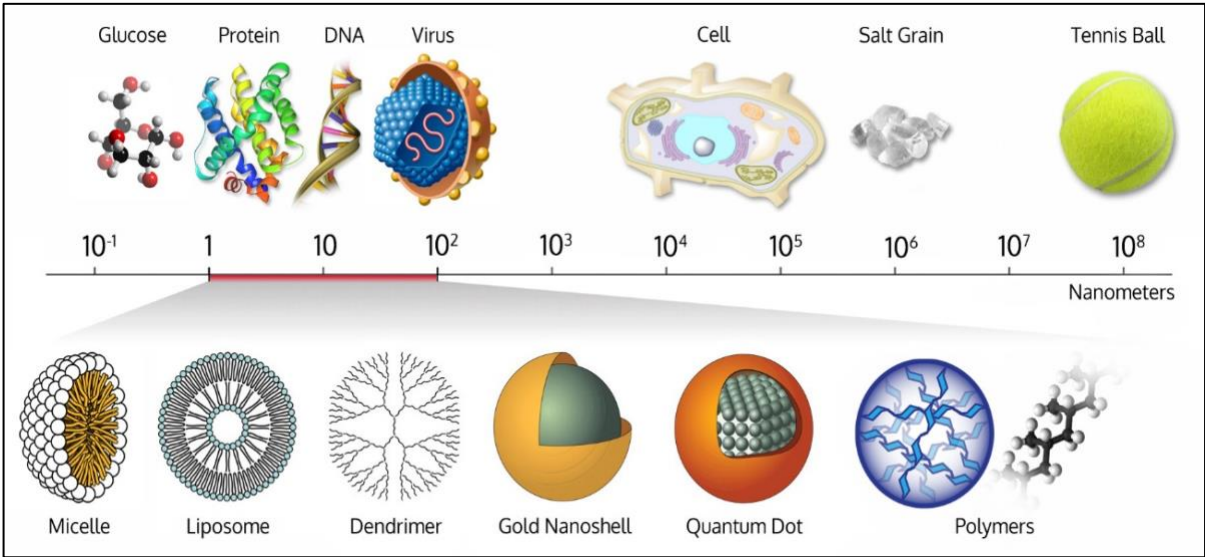


Figura 1 - Tamanho comparativo de 1 nm.
Fonte: O autor (2025), adaptado de ISO/TR 18401:2017 – Nanotechnologies: Plain language explanation of selected terms from the ISO/IEC 80004 series. International Organization for Standardization (ISO).

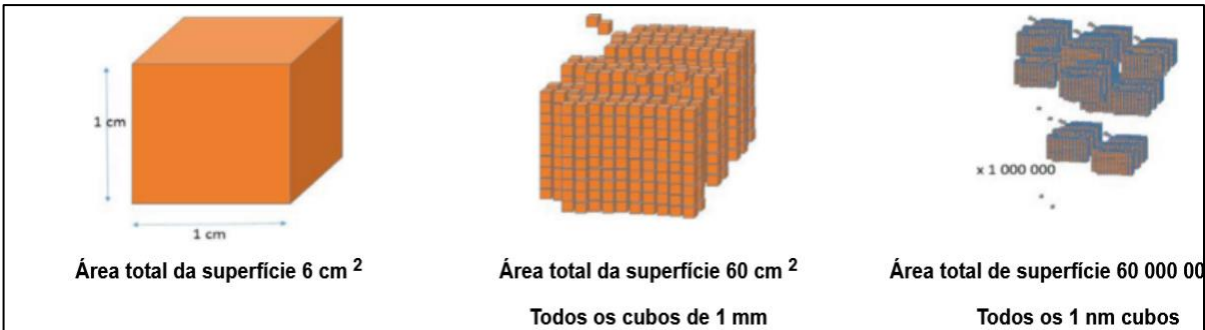


Figura 2 - Aumento da área de superfície pelo aumento da divisão.
Fonte: ISO/TR 18401:2017 – Nanotechnologies: Plain language explanation of selected terms from the ISO/IEC 80004 series. International Organization for Standardization (ISO).

Tabela 1 - Aumento da área de superfície pelo aumento da divisão.

Estado do material	Tamanho de cada cubo	Número de cubos	Área total da superfície
Cubo maciço original	1 cm de aresta	1	6 cm ²
Após 1ª divisão	1 mm (0,1 cm)	1 000	60 cm ²
Após 2ª divisão	1 nm (10 ⁻⁷ cm)	1 sextilhão (10 ²¹)	60 000 000 cm ² (6 000 m ²)

Fonte: O autor (2025), adaptado de ISO/TR 18401:2017 – Nanotechnologies: Plain language explanation of selected terms from the ISO/IEC 80004 series. International Organization for Standardization (ISO).

Tabela 2 - Área final em unidades do cotidiano (equivalente a 6 000 m²).

Unidade de referência	Equivalência
Metros quadrados (m ²)	6 000 m ²
Hectares (ha)	0,6 ha
Campos de futebol FIFA	≈ 0,84 campos
Apartamentos de 100 m ²	60 unidades

Fonte: O autor (2025), adaptado de ISO/TR 18401:2017 – Nanotechnologies: Plain language explanation of selected terms from the ISO/IEC 80004 series. International Organization for Standardization (ISO).

Essas características são particularmente relevantes para aplicações agrícolas, pois influenciam diretamente a solubilidade, a reatividade e a capacidade de interação das nanopartículas com tecidos vegetais. No caso da soja, tais propriedades sustentam o interesse no uso de nanopartículas como veículos de fornecimento de micronutrientes essenciais, bem como moduladores de processos fisiológicos.

Em dimensão entre 1 e 100 nanômetros, os materiais passam a apresentar propriedades físicas, químicas e biológicas distintas daquelas observadas em escalas macro ou microscópicas, em razão do aumento significativo da área superficial específica e da predominância de efeitos quânticos. Essas características conferem aos nanomateriais comportamentos singulares, capazes de ampliar sua reatividade, solubilidade e interação com sistemas biológicos (Bhushan, 2017; Kah et al., 2019).

2.1.2. Fundamentos

O marco inicial da nanociência é frequentemente atribuído à palestra de Richard Feynman em 1959, na qual ele afirmou: "Há bastante espaço lá embaixo" ("There's plenty of room at the bottom"), referindo-se à possibilidade de manipular a matéria em escala atômica e construir dispositivos em dimensões reduzidas (FEYNMAN apud OTUBO, 2005; FERREIRA; RANGEL, 2009). O termo "nanotecnologia" foi introduzido em 1974 pelo pesquisador Norio Taniguchi para descrever avanços que transcendiam o controle de materiais em microescala (TANIGUCHI apud FERREIRA; RANGEL, 2009). O conceito foi posteriormente popularizado por Eric Drexler em 1986, que o definiu como o processamento baseado na manipulação individual de átomos (FUNDACENTRO, 2008). Inicialmente voltada à física e à engenharia de materiais, a nanotecnologia expandiu-se para a biologia e, mais recentemente, para a agricultura (KUMAR et al., 2021).

No agronegócio, sua relevância decorre das limitações dos fertilizantes convencionais de Zn e Fe: alta insolubilidade em solos tropicais, antagonismo iônico e dependência de

transportadores de membrana, que restringem a absorção e geram perdas de até 50% do nutriente (RALIYA et al., 2018; BRIAT et al., 2020; HANIF et al., 2024).

As vantagens das nanopartículas de ZnO e Fe₂O₃ frente a esses gargalos, maior reatividade, eficiência nutricional superior e capacidade de transpor barreiras biológicas, são detalhadas nos capítulos 5, 6 e 7 desta revisão.

2.1.3. Nanotecnologia no contexto brasileiro

No cenário nacional, a consolidação da nanotecnologia como prioridade estratégica foi formalizada pela criação do Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias (SisNANO), que visa estruturar uma infraestrutura de laboratórios de ponta para apoiar a inovação industrial e o desenvolvimento de materiais estratégicos como nanopartículas, nanossensores e nanocompósitos (BRASIL, 2012). O Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE), integrante do SisNANO, destaca-se por dispor de um dos parques laboratoriais mais completos do país para manipulação da matéria em escala atômica, sendo essencial para o desenvolvimento de nanomateriais metálicos voltados à agricultura (CETENE, 2021).

Paralelamente, o SibratecNANO tem operado como mecanismo de fomento à inovação, tendo aportado cerca de R\$ 18 milhões em projetos estratégicos desde 2016. O programa oferece suporte financeiro que varia conforme o porte da empresa parceira, sendo decisivo para micro e pequenas empresas, que representam 80% das participantes, superarem as barreiras econômicas da alta tecnologia e incorporarem nanomateriais em áreas como saúde e agropecuária (BRASIL, 2023). Este arcabouço institucional e financeiro é fundamental para viabilizar a produção e caracterização de nanopartículas de ferro e zinco, cuja síntese exige controle rigoroso de variáveis para garantir estabilidade e reprodutibilidade (OTUBO, 2005).

Assim, a nanotecnologia aplicada à soja deve ser compreendida não apenas como uma inovação tecnológica, mas como parte de uma estratégia integrada de intensificação sustentável da produção agrícola no contexto brasileiro.

2.2. Síntese de nanopartículas

2.2.1. Abordagens top-down e bottom-up

Na síntese de nanopartículas, a rota de preparação é determinante para o controle rigoroso da morfologia, do tamanho final e das propriedades físico-químicas do material. As metodologias de síntese são tradicionalmente classificadas em duas abordagens principais: *top-down* (de cima para baixo) e *bottom-up* (de baixo para cima). A Figura 3 apresenta um esquema

comparativo entre as principais rotas de síntese (física, química e biológica) e suas respectivas abordagens top-down e bottom-up (Ijaz et al. 2020 apud Sena, 2023).

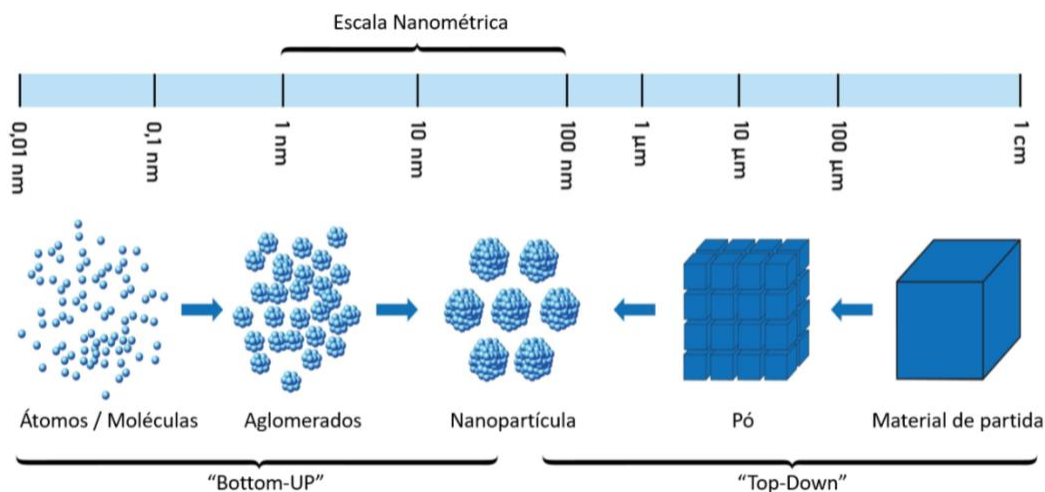


Figura 3. Técnicas de síntese “top-down” ou “bottom-up.”

Fonte: O autor (2025), adaptado de Ferreira e Rangel (2009) e Sena (2023).

A técnica *top-down* envolve a fragmentação de materiais macroscópicos (como pós de óxidos metálicos) em partículas nanométricas, sendo considerada um processo destrutivo. Esta abordagem consiste na redução de estruturas maiores em partículas nanométricas, utilizando métodos como a moagem mecânica, a ablação a laser ou a decomposição térmica para alcançar a escala desejada. Os métodos físicos, como moagem de alta energia e deposição por vapor, enquadram-se nesta abordagem e são menos frequentes em aplicações agrícolas em razão do elevado custo energético (Ferreira; Rangel, 2009).

Por outro lado, a estratégia *bottom-up* (de baixo para cima) se destaca por ser um método construtivo e de alta precisão. Esta abordagem fundamenta-se na manipulação atômica ou molecular, em que unidades individuais são organizadas sistematicamente para edificar o material (Rao et al. 2004 apud Ferreira; Rangel, 2009). Tal procedimento permite um controle refinado sobre as propriedades físico-químicas, resultando em arquiteturas nanométricas com morfologias customizadas conforme a aplicação desejada (Feynman, 1960 apud Otubo, 2005).

2.2.2. Métodos químicos e biológicos (síntese verde)

Os métodos químicos são os mais amplamente empregados e incluem técnicas como precipitação química, sol-gel e redução química, as quais permitem um controle rigoroso sobre o tamanho, a morfologia e a pureza das nanopartículas (Ferreira; Rangel, 2009; Mayrinck et al., 2014). O controle de parâmetros como pH, temperatura e agente redutor permite modular

morfologia e tamanho, por exemplo, a formação de nanoflores de ZnO em pH alcalino elevado (Mayrinck et al., 2014).

Os métodos biológicos (síntese verde) têm ganhado destaque nos últimos anos por utilizarem extratos vegetais ou microrganismos como agentes redutores, sendo associados a um menor impacto ambiental (Ferreira; Rangel, 2009). Uma abordagem relevante para o manejo sustentável da soja é apresentada por Bilesky-José (2020), que desenvolveu nanopartículas de óxido de ferro (NPFe) através de uma rota de síntese verde, utilizando o filtrado do fungo biocontrolador *Trichoderma harzianum* como agente redutor. O material resultante apresentou diâmetro hidrodinâmico de 207,3 nm, potencial zeta de 13,47 mV e uma concentração de $4,4 \times 10^{11}$ NPs/mL. Embora as diretrizes da norma ISO/TS 80004-1 estabeleçam a nanoescala estrita entre 1 e 100 nm, a autora classifica o material como nanoestruturado. Esta classificação se sustenta no fato de o material metálico manter propriedades bioativas de escala nanométrica, enquanto o diâmetro total (hidrodinâmico) é ampliado pela formação de uma "corona" de biomoléculas (proteínas e metabólitos) que revestem e estabilizam a partícula.

Oliveira Júnior (2025) também compilou dados sobre síntese verde de NPZnO, destacando a produção de nanopartículas a partir de folhas de *Fagonia indica* (tamanho abaixo de 900 nm) e de formato hexagonal obtidas de extrato de *Melia azedarach* (30-40 nm), as quais demonstraram alto potencial no controle de patógenos fúngicos em sementes de soja (Lakshmeesha et al., 2020 apud Oliveira Júnior, 2025).

2.2.3. Controle morfológico: pH e nanoflores de ZnO (Mayrinck et al., 2014)

A Figura 4 ilustra esquematicamente o processo de formação de diferentes nanoestruturas de ZnO. A figura demonstra como variações nas condições de síntese, como o ajuste do pH, podem resultar em diferentes arquiteturas nanométricas, desde bastões até estruturas complexas conhecidas como nanoflores (Mayrinck et al., 2014).

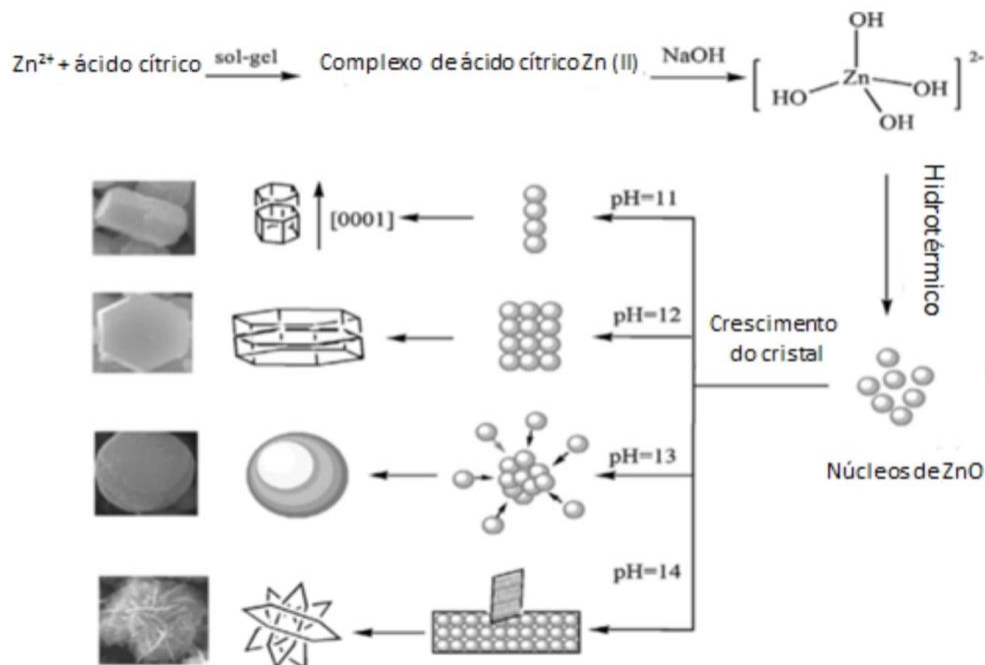


Figura 4. Ilustração esquemática do processo de formação de diferentes nanoestruturas de ZnO.

Fonte: Mayrinck et al. (2014, p. 1199).

O cristal de ZnO possui polos com cargas diferentes, o que faz com que ele cresça em direções específicas dependendo da quantidade de hidroxilas (OH^-) disponíveis no meio:

- **Em pH 11:** Existe uma preferência de crescimento em uma única direção (eixo vertical), formando bastões ou prismas.
- **Em pH 12:** O aumento de OH^- bloqueia esse crescimento vertical e força a partícula a crescer para os lados, resultando em discos hexagonais.
- **Em pH 13:** As partículas buscam a forma mais estável e com menor gasto de energia, agrupando-se em formato de esferas.
- **Em pH 14:** A alta concentração de reagentes causa uma reação muito rápida, criando folhas finas que se sobrepõem e se entrelaçam até formar as nanoflores.

Essa diversidade morfológica é um fator determinante para a eficiência agronômica, uma vez que estruturas como as nanoflores apresentam maior área superficial, permitindo maior interação do zinco com os tecidos vegetais e facilitando a absorção e translocação do nutriente pela cultura da soja.

Nesse contexto, a morfologia de 'nanoflor' assume um papel que vai além da maior área de contato. Pesquisas de vanguarda, como a de Singh et al. (2024), publicada na *Nature Communications*, revelaram que a arquitetura das nanoflores possui "vagas atômicas" e propriedades eletrônicas únicas capazes de estimular a biogênese mitocondrial em células

mamíferas. Embora o estudo original não seja aplicado a plantas, a transposição desse conceito para as ciências agrárias sugere que o uso de ZnO no formato de nanoflores pode não apenas nutrir, mas potencializar o metabolismo energético da soja (SINGH et al., 2024; MAYRINCK et al., 2014).

2.3. Caracterização de nanopartículas

A caracterização das nanopartículas é etapa fundamental nos estudos revisados, uma vez que parâmetros como tamanho, forma, área superficial, carga superficial e estado de dispersão influenciam diretamente sua reatividade, estabilidade coloidal e biodisponibilidade em sistemas biológicos (Mayrinck et al., 2014; Kah et al., 2019). A diversidade de métodos de obtenção e a sensibilidade das propriedades às condições de síntese explicam a variabilidade de resultados encontrados na literatura, o que torna a caracterização rigorosa indispensável para a reprodutibilidade dos estudos (Ferreira; Rangel, 2009).

O tamanho primário e a morfologia das nanopartículas são tradicionalmente obtidos por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia eletrônica de transmissão (MET), enquanto a estrutura cristalina é determinada por difração de raios X (DRX). Técnicas como espectroscopia no infravermelho (FTIR) complementam a análise de grupos funcionais de superfície (Mayrinck et al., 2014).

Entretanto, é o tamanho hidrodinâmico (D_H), diâmetro da partícula em meio líquido, incluindo camadas de solvatação (íons, moléculas de água) e quaisquer revestimentos orgânicos ou inorgânicos, que efetivamente governa a mobilidade, a interação com barreiras biológicas e o potencial de internalização celular. Este parâmetro, mensurado por espalhamento dinâmico de luz (DLS), difere substancialmente do tamanho primário do núcleo seco obtido por MET/MEV (Zuverza-Mena et al., 2017).

A estabilidade coloidal das dispersões é determinada pelo potencial zeta (ζ), medida indireta da carga superficial líquida da partícula. Valores absolutos elevados (geralmente $|\zeta| > 30$ mV) indicam estabilidade elevada, pois as forças repulsivas impedem a agregação; valores próximos de zero levam à aglomeração ou agregação rápida, alterando drasticamente o tamanho efetivo, a superfície reativa e, conseqüentemente, a biodisponibilidade do material (HANIF et al., 2024). A inconsistência nos resultados reportados pela literatura é frequentemente atribuída à negligência na caracterização dessas propriedades de superfície. Sem o controle e reporte do potencial zeta e do uso de revestimentos, a 'caixa-preta' experimental impede que se determine se um resultado negativo foi causado pela toxicidade intrínseca do elemento ou pela instabilidade física da partícula no meio de aplicação (HANIF et al., 2024).

A omissão ou reporte incompleto desses parâmetros críticos gera uma incerteza metodológica que é uma das fontes primárias das discrepâncias na literatura. Estudos que nominalmente avaliam "NPs de ZnO" ou "NPs de Fe₂O₃" podem, na prática, estar testando materiais com tamanhos efetivos, cargas superficiais, estados de agregação e estabilidades coloidais radicalmente distintos (Kah et al., 2019). O estudo de Sheykhabglou et al. (2010 apud Siddiqi; Husen, 2017) é ilustrativo: o tamanho específico das nanopartículas de Fe₂O₃ não foi discriminado, sendo as mesmas identificadas apenas pela sua natureza nanométrica, o que inviabiliza a reprodução do experimento e a comparação com resultados posteriores.

A ausência de padronização na descrição dessas propriedades constitui, portanto, uma lacuna metodológica central. Esta revisão, ao mapear a literatura, busca não apenas compilar resultados, mas evidenciar a necessidade de que estudos futuros adotem protocolos mínimos de caracterização, incluindo tamanho primário, morfologia, tamanho hidrodinâmico, potencial zeta, concentração coloidal e técnicas utilizadas, como pré-condição para a validação e o avanço consistente da nanotecnologia agrícola.

2.4. Interação nanopartícula-planta

2.4.1. Vias de absorção e barreiras biológicas

A internalização e distribuição de nanopartículas (NPs) nos tecidos vegetais constituem a etapa inicial que define seu potencial funcional, figura 5. Este processo é governado por uma interface complexa entre as propriedades físico-químicas do nanomaterial e a arquitetura anatômica da planta, diferindo radicalmente da dinâmica de íons solúveis (Lv et al., 2019; Wang et al., 2016). A eficiência das vias de entrada é modulada por parâmetros como tamanho, carga superficial (potencial zeta), morfologia e hidrofobicidade, que determinam a estabilidade coloidal, a adesão aos tecidos e a capacidade de atravessar membranas biológicas (Lv et al., 2019).

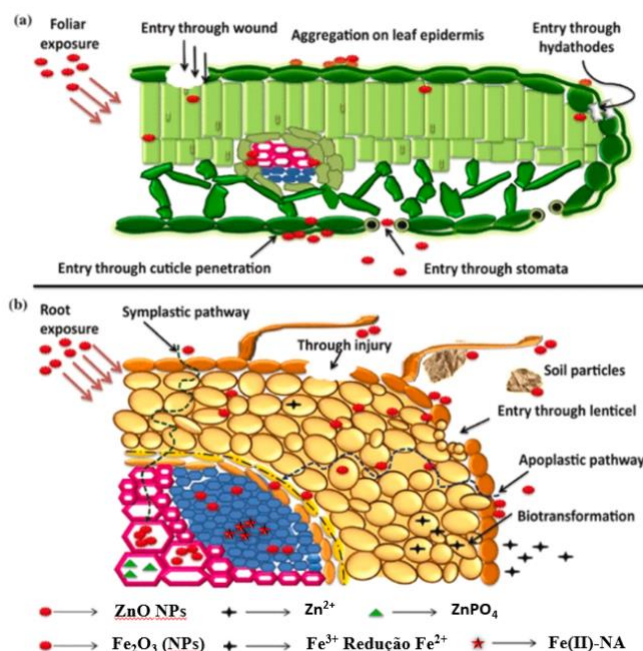


Figura 5. Representação esquemática das vias de absorção A (Foliar) e B (Radicular) para nanopartículas de ZnO e Fe₂O₃.

Fonte: Adaptado de Hanif et al. (2024), Wang et al. (2016) e Rodrigues et al. (2015).

Na aplicação foliar, a primeira barreira é a cutícula, matriz lipídica e hidrofóbica que recobre a epiderme. NPs com características superficiais compatíveis podem atravessá-la por difusão passiva, mas a rota alternativa e frequentemente mais eficiente são os estômatos, estruturas reguladas dinamicamente que permitem a entrada de partículas em suspensão junto ao fluxo transpiratório, desde que seu tamanho seja inferior ao do poro estomático (20–30 nm nos estudos validados) (Ramos; Rocha, 2024; Schwab et al., 2016; Wang et al., 2013). Após a internalização no mesofilo, as NPs podem seguir o apoplasto (espaços intercelulares e paredes celulares, movimento passivo) ou o simplasto (interior celular interconectado por plasmodesmos, envolvendo endocitose ou transporte ativo) (Schwab et al., 2016; Wang et al., 2013).

Na via radicular, a interação inicia-se na rizosfera, ambiente quimicamente ativo que pode modificar a superfície, a carga e o estado de agregação das NPs. A absorção ocorre principalmente pelos pelos radiculares, zonas de alta permeabilidade e atividade metabólica. O transporte subsequente para a parte aérea dá-se essencialmente pelo xilema, conduzido pela força do fluxo transpiratório (Dimkpa; Bindraban, 2018). Enquanto o zinco é absorvido como íon (Zn^{2+}) após a dissolução das NPs de ZnO, o ferro exige redução química ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) para atravessar a membrana celular; partículas menores que 20 nm podem ser internalizadas integralmente via endocitose (Franco; Loomis, 1948; Wang et al., 2016).

A permeabilidade dos tecidos aos nanomateriais é governada por limites estritos de exclusão de tamanho (SEL - *Size Exclusion Limits*) exemplificado na tabela 3, que funcionam como filtros biológicos determinando não apenas a entrada, mas a velocidade com que o potencial funcional do nutriente será exercido (HANIF et al., 2024; SIDDIQI; HUSEN, 2017). A cutícula foliar, por sua matriz cerosa, limita a passagem direta a partículas inferiores a 5 nm. A parede celular estabelece a barreira final, com SEL médio entre 5 e 20 nm, retendo partículas maiores no espaço apoplástico a menos que mecanismos de endocitose sejam recrutados. Em contrapartida, os poros estomáticos apresentam aberturas de 10 a 80 μm (10.000–80.000 nm), permitindo que NPs maiores penetrem e naveguem pelo fluxo sistêmico, o que os torna a principal via de acesso para partículas que excedem o limite de exclusão da parede celular (Hanif et al., 2024; Neta et al., [(sem data) s.d.]; Rodrigues et al., 2015).

Tabela 3: Barreiras Biológicas e Limites de Exclusão de Tamanho (SEL) para Nanopartículas

Barreira Vegetal	Limite de Tamanho (SEL)	Mecanismo de Passagem	Impacto na Translocação
Cutícula Foliar	< 5 nm	Difusão lipofílica / Poros cuticulares	Lenta e altamente seletiva.
Parede Celular	5 nm a 20 nm	Filtração física (Peneira celular)	Retenção no apoplasto se > 20 nm.
Estômatos	10 a 80 μm *	Fluxo de massa (Portas abertas)	Principal via para NPs > 20 nm (barradas pela parede celular), facilitando o acesso ao floema.
Membrana Radicular	Variável	Endocitose / Proteínas ZIP e HMA	Transporte sistêmico via xilema.

Fonte: Adaptado de Hanif et al. (2024), Wang et al. (2016) e Neta et al. [s.d.] *Nota: Dimensões micrométricas conforme Neta et al. [s.d.], equivalentes a 10.000 - 80.000 nm.

Essa seletividade física sustenta a alta eficiência de entrega da nanotecnologia: enquanto fertilizantes iônicos convencionais sofrem com saturação de transportadores e perdas ambientais, NPs de ZnO bem caracterizadas disponibilizam 50% a 80% do elemento de forma gradual (*slow release*). O impacto produtivo de 150 kg de fertilizante convencional pode ser equiparado por apenas 40 a 50 kg de material nanoestruturado, desde que respeitados os limites de tamanho para translocação via floema, otimizados em diâmetros abaixo de 20 nm (HANIF et al., 2024).

Para além da nutrição, a interação das NPs com os tecidos vegetais engloba mecanismos de defesa sanitária que atuam ainda na fase de absorção. Em sementes de soja, NPZnO de 20 nm exerce efeito fungistático sobre *Aspergillus* spp. e *Penicillium* spp., protegendo as reservas da semente e garantindo maior vigor germinativo (Melazzo, 2025). NPs hexagonais de ZnO

(30–40 nm), sintetizadas a partir de extrato de *Melia azedarach*, apresentaram alto potencial no controle de *Cladosporium cladosporioides* e *Fusarium oxysporum* em sementes, consolidando o uso do zinco nanoestruturado como nanopesticida biogênico (Lakshmeesha et al., 2020 apud Oliveira Júnior, 2025).

2.4.2. Translocação sistêmica e homeostase metálica

Uma vez internalizadas, as NPs de ZnO e Fe₂O₃ são translocadas pelo sistema vascular. Esta dinâmica não apenas supre carências nutricionais, mas altera a expressão gênica e a atividade antioxidante da planta. Em doses controladas, observa-se a manutenção da homeostase; em exposições prolongadas ou concentrações elevadas, ocorre o rompimento do equilíbrio redox, caracterizando a dualidade funcional desses materiais (Zuverza-Mena et al., 2017).

A translocação sistêmica para órgãos drenos, raízes, frutos jovens e grãos, ocorre predominantemente via floema. O transporte via xilema, conduzido pelo fluxo transpiratório, é a rota principal para a distribuição de íons e partículas absorvidas pelas raízes em direção à parte aérea (Dimkpa; Bindraban, 2018; Schwab et al., 2016; Wang et al., 2013). Após a entrada, a planta garante a segurança metabólica através da quelação por nicotianamina (NA), formando o complexo Fe(II)-NA. Este complexo atua como uma "escolta" que neutraliza a toxicidade do ferro livre e serve como "ticket de transporte" no floema, permitindo que o ferro seja "embalado" e translocado de forma eficiente das folhas e raízes até os grãos, viabilizando a biofortificação com segurança biológica (Kobayashi; Nishizawa, 2012; Briat et al., 2020).

No caso de NPs biogênicas de Fe₂O₃ sintetizadas com *Trichoderma harzianum*, a presença de uma corona de biomoléculas (proteínas e metabólitos fúngicos) elevou o diâmetro hidrodinâmico para 207,3 nm, muito acima da faixa nominal de 1–100 nm. Ainda assim, o material manteve bioatividade e estabilidade coloidal por impedimento estérico (potencial zeta de +13,47 mV), sendo internalizado e translocado sem fitotoxicidade aparente em soja, com incremento de área foliar aos 25 dias de cultivo (Bilesky-José, 2020). Este caso evidencia que a identidade biológica da partícula, determinada pela corona, pode ser mais relevante para a translocação do que o tamanho primário do núcleo metálico.

3.4.3. Destino subcelular: dissolução, liberação iônica, compartimentalização e limites da homeostase

Após a internalização, as NPs de óxidos metálicos como ZnO e Fe₂O₃ sofrem dissolução parcial ou total, processo catalisado pelo ambiente ácido dos espaços apoplásticos, dos vacúolos ou por agentes quelantes exsudados pela planta. A liberação controlada de íons (Zn²⁺, Fe²⁺/Fe³⁺) é o mecanismo central que permite o funcionamento das NPs como fonte nutricional eficiente e de liberação lenta (Mayrinck et al., 2014).

Os íons liberados são assimilados pelos sistemas celulares. O Zn²⁺ atua como cofator estrutural ou catalítico essencial para centenas de metaloenzimas, incluindo anidrase carbônica, superóxido dismutase (SOD) de Cu/Zn e RNA polimerases, sendo fundamental para o metabolismo de carboidratos, síntese proteica e integridade das membranas (Wang et al., 2013). O Fe é componente central de complexos proteicos vitais, como citocromos da cadeia transportadora de elétrons, ferredoxina na fotossíntese e enzimas antioxidantes (catalase, peroxidases), sendo indispensável para produção de energia e destoxificação celular (Briat et al., 2020). A incorporação bem-sucedida destes íons explica ganhos fisiológicos como o aumento de 43,78% no teor de clorofila e 54,28% na biomassa radicular de soja tratada com NPFe, associado à elevação de 45,59% na atividade da SOD (Guo et al., 2025).

Para manter a homeostase e evitar citotoxicidade, a planta emprega mecanismos de detoxificação e compartimentalização. Íons em excesso são sequestrados em vacúolos ou complexados por ligantes orgânicos como fitoquelatinas e metalotioneínas. O equilíbrio entre utilização metabólica ativa e armazenamento define a estreita janela de eficácia das NPs: doses muito baixas são nutricionalmente irrelevantes; doses dentro da janela suprem a demanda de cofatores; doses excessivas sobrecarregam os sistemas de compartimentalização (Kah et al., 2019).

Dados compilados por Hanif et al. (2024) para soja estabelecem limiares críticos: 120 mg/kg de ZnO NPs (38–59 nm) via solo atuam como promotor de crescimento, elevando a atividade de SOD, CAT e POX; 400 mg/kg revertem o benefício, resultando em inibição do crescimento radicular e redução da biomassa total. Este fenômeno demonstra que a homeostase redox da soja possui um limite de tolerância específico, e que a ativação do sistema antioxidante pode ser interpretada de duas formas: como fortalecimento adaptativo (preparação para estresses futuros) ou como resposta ao estresse provocado pela própria nanopartícula (Javed et al., 2024). A fronteira entre ambas é definida pela relação dose-resposta e pelo contexto ambiental.

Quando a capacidade de compartimentalização é sobrepujada, o acúmulo tóxico de íons livres no citosol desencadeia geração exacerbada de espécies reativas de oxigênio (EROs), peroxidação lipídica das membranas (quantificada pelo aumento de malondialdeído, MDA) e colapso da homeostase celular (KAH et al., 2019). Em casos extremos, observa-se genotoxicidade: NPZnO de apenas 8 nm, aplicadas em doses de 2000 a 4000 mg/L, induziram alterações no perfil de bandas de DNA (RAPD) em raízes (López-Moreno et al., 2010 apud Siddiqi; Husen, 2017). Este mecanismo subcelular é a base fisiológica da dualidade observada em nível de planta inteira, definindo o limiar crítico entre benefício nutricional e fitotoxicidade que constitui o eixo central desta revisão.

2.5. Nanopartículas de ZnO em soja

2.5.1. Efeitos nutricionais e bioestimulantes

O zinco é cofator essencial para centenas de metaloenzimas, atuando na ativação enzimática, síntese proteica, expressão gênica e integridade de membranas — processos críticos para a soja (WANG et al., 2013). Em escala nanométrica, NPs de ZnO apresentam maior área superficial, solubilidade e reatividade que fontes convencionais (sulfatos, óxidos micrométricos), potencializando absorção e translocação do nutriente mesmo em doses reduzidas (RALIYA et al., 2018; MGADI et al., 2024). Em soja, doses entre 10-200 mg/kg (20-60 nm) aumentam atividade enzimática, teor de clorofila e biomassa (RALIYA et al., 2018). Estudo com tomateiros, utilizado como modelo análogo, demonstrou que NPZnO (20 nm, 10 mg/L, via foliar) sob irrigação plena eleva produtividade em número e massa de frutos (RAMOS; ROCHA, 2024). Embora não conduzido em soja, o princípio fisiológico da bioestimulação por ZnO nanoestruturado é transversal e respalda as investigações na cultura-alvo.

2.5.2. Morfologia e funcionalidade: nanoflores

A morfologia das NPs de ZnO é determinante para sua eficiência agronômica. Estruturas com maior área superficial, como as nanoflores, permitem maior interação do zinco com os tecidos vegetais, facilitando absorção e translocação do nutriente (Mayrinck et al., 2014). O controle do pH na síntese sol-gel permite obter diferentes arquiteturas, sendo as nanoflores obtidas em pH 14 e as de maior área superficial (Mayrinck et al., 2014).

Pesquisas com nanoflores de MoS₂ em células mamíferas revelaram que tais arquiteturas, por suas vagas atômicas, estimulam a biogênese mitocondrial. Embora o estudo

não seja aplicado a plantas e o material seja distinto (MoS₂, não ZnO), a transposição desse conceito abre a hipótese de que nanoflores de ZnO possam potencializar o metabolismo energético da soja, tornando-a mais eficiente em crescimento e resposta a estresses abióticos, fronteira ainda não explorada na cultura (Singh et al., 2024; Mayrinck et al., 2014).

2.5.3. Respostas sob estresse abiótico (déficit hídrico)

A eficácia do ZnO é dose-dependente e modulada pelo ambiente. Em tomateiros, a dose bioestimulante sob irrigação plena (20 nm, 10 mg/L, via foliar) foi insuficiente para mitigar danos sob déficit severo (50% ETc), fechamento estomático, redução da condutância e transpiração, queda de biomassa, degradação de clorofila e inibição radicular (Ramos; Rocha, 2024; Javed et al., 2024).

Para a soja, o princípio é análogo: atenuação de danos oxidativos via SOD/CAT em estresse moderado, mas benefício anulado em déficit severo (Javed et al., 2024; Santás-Miguel et al., 2023). A bioestimulação nanoestruturada depende, portanto, da homeostase hídrica da cultura como pré-condição para sua eficácia.

2.5.4. Sanidade de sementes e atividade antifúngica

O nanocondicionamento via seca com NPZnO (20 nm, 200 mg/kg) em soja mantém a qualidade fisiológica das sementes durante o armazenamento, diferentemente do método úmido, que pode comprometer a respiração por excesso de hidratação (MELAZZO, 2025). Paralelamente, as NPs exercem efeito fungistático sobre *Aspergillus* spp. e *Penicillium* spp., protegendo as reservas da semente (MELAZZO, 2025).

A diversidade morfológica das NPs também influencia o potencial sanitário. NPs hexagonais (30-40 nm) obtidas por síntese verde de *Melia azedarach* controlam *Cladosporium cladosporioides* e *Fusarium oxysporum* em sementes de soja, consolidando o ZnO como nanopesticida biogênico (OLIVEIRA JÚNIOR, 2025).

2.5.5. Fitotoxicidade em doses elevadas

O limiar entre bioestimulação e fitotoxicidade é estreito. Em soja, os efeitos tóxicos são dose e tamanho-dependentes, incluindo genotoxicidade, antagonismo iônico (redução de Fe, Mg, K) e interrupção da formação de sementes, detalhados na seção 8.2 em conjunto com o conceito de hormese (Siddiqi; Husen, 2017).

Os mecanismos subjacentes envolvem acúmulo tóxico de íons Zn^{2+} no citosol, sobrecarga dos sistemas de compartimentalização (vacúolos, fitoquelatinas), geração exacerbada de EROs, peroxidação lipídica (MDA) e danos ao DNA (Kah et al., 2019; Siddiqi; Husen, 2017).

2.6. Nanopartículas de Fe_2O_3 em soja

2.6.1. Biofortificação e eficiência fotossintética

O ferro é considerado o pilar da fotossíntese e da respiração celular, atuando como cofator essencial em complexos enzimáticos e no transporte de elétrons. O uso de Fe_2O_3 nanoestruturado surge como uma alternativa biotecnológica estratégica para aumentar a biodisponibilidade deste micronutriente, especialmente em solos complexos onde as fontes convencionais sofrem rápida precipitação ou fixação (BRIAT et al., 2020). Na cultura da soja, a aplicação dessas partículas tem sido diretamente associada ao incremento do teor de clorofila, à estabilidade do aparato fotossintético e ao aumento da atividade metabólica geral (Ahmad et al., 2022).

Neste contexto de alta eficiência produtiva sob dosagens controladas, Sheykhbaglou et al. (2010 apud Siddiqi; Husen, 2017) observaram que a aplicação foliar de NPs de Fe_2O_3 em concentrações de até 1,0 g/L promoveu um incremento expressivo de 48% no rendimento de grãos de soja, acompanhado de um aumento no peso seco de folhas e vagens¹. Esse resultado ratifica que a fonte nanométrica de ferro, quando bem manejada, otimiza a translocação de fotoassimilados para os órgãos reprodutivos, superando as limitações das fontes iônicas convencionais.

Evidências práticas demonstram que a eficácia do ferro nanoestruturado está intrinsecamente ligada ao regime hídrico e à granulometria. Segundo Ramos e Rocha (2024), em estudo conduzido com tomateiros, modelo análogo à soja, a aplicação de NPs de ferro de 30 nm na dose de 10 mg/L via foliar promoveu benefícios produtivos significativos em condições de suprimento hídrico adequado (100% ETc), elevando a produção de frutos comerciais. No entanto, de forma análoga ao observado com o zinco, sob estresse hídrico severo (50% ETc), essa mesma dosagem de ferro não foi capaz de mitigar os danos fisiológicos causados pela seca. A severidade do déficit hídrico impediu que a planta convertesse o suporte

¹ Nota de rodapé: Conforme a revisão de Siddiqi e Husen (2017), o tamanho específico (diâmetro) das nanopartículas utilizadas no experimento de Sheykhbaglou et al. (2010) não foi discriminado pelos autores da revisão, sendo as mesmas identificadas apenas pela sua natureza nanométrica.

nutricional em ganhos de biomassa, reafirmando que a bioestimulação nanoestruturada depende da homeostase hídrica da cultura como pré-condição para sua eficácia.

Na soja, observa-se um comportamento similar de ganho de vigor, contudo, a heterogeneidade metodológica, que abrange desde o nanocondicionamento de sementes até aplicações foliares em diferentes estádios fenológicos, exige cautela na definição de protocolos. A fronteira entre o benefício nutricional e a fitotoxicidade é definida pelo tempo de exposição, pela estabilidade da nanopartícula e, sobretudo, pela concentração aplicada.

2.6.2. Controle de patógenos radiculares (*Fusarium oxysporum*)

Guo et al. (2025) investigaram o potencial de nanopartículas de óxido de ferro (NPFe) comerciais em experimentos conduzidos em casa de vegetação (Sichuan, China). O estudo utilizou as cultivares de soja (*Glycine max*) ND12 e C103 no estágio inicial de desenvolvimento (V2/V3). As nanopartículas, com dimensões entre 15–20 nm e pureza de 99%, foram obtidas via condensação de vapor químico e aplicadas por via foliar na dose de 50 mg/L, utilizando o surfactante GE Silwet L-77 para otimizar a adesão.

A aplicação demonstrou uma eficácia significativa no controle do fitopatógeno *Fusarium oxysporum*, agente causador da podridão radicular, reduzindo a severidade da doença em até 60,29%. Os dados revelaram que este efeito protetor é resultado de uma profunda reprogramação metabólica na planta, evidenciada pela:

- Elevação da expressão do gene de defesa *GmPAL* em 16,64 vezes;
- Incremento de 102,06% nos metabólitos do Ciclo de TCA, otimizando o aporte energético para o sistema imunológico da cultura;
- Mitigação do estresse oxidativo, com elevação da atividade da enzima SOD em 45,59%.

Esta modulação fisiológica refletiu-se em ganhos estruturais importantes: aumento de 54,28% na biomassa radicular e 43,78% no teor de clorofila. Tais mecanismos ratificam a eficiência do ferro nanoestruturado em translocar sinais de resistência sistêmica, superando as limitações de transporte comumente observadas em fontes iônicas tradicionais (Guo et al., 2025).

2.6.3. Síntese verde e controle de *Sclerotinia sclerotiorum*

Uma abordagem relevante para o manejo sustentável da soja é apresentada por Bilesky-José (2020), que desenvolveu nanopartículas de óxido de ferro (NPFe) através de uma rota de

síntese verde, utilizando o filtrado do fungo biocontrolador *Trichoderma harzianum* como agente redutor. O material resultante apresentou diâmetro hidrodinâmico de 207,3 nm, potencial zeta de 13,47 mV e concentração de $4,4 \times 10^{11}$ NPs/mL.

Embora as diretrizes da norma ISO/TS 80004-1 estabeleçam a nanoescala estrita entre 1 e 100 nm, a autora classifica o material como nanoestruturado. Esta classificação se sustenta no fato de o núcleo metálico manter propriedades bioativas de escala nanométrica, enquanto o diâmetro total (hidrodinâmico) é ampliado pela formação de uma corona de biomoléculas (proteínas e metabólitos fúngicos) que reveste e estabiliza a partícula por impedimento estérico.

A eficiência fungicida destas nanopartículas foi testada contra o patógeno *Sclerotinia sclerotiorum*, agente causador do mofo-branco, uma das doenças mais destrutivas da soja. Em ensaios *in vitro*, a aplicação da nanossuspensão demonstrou um impacto severo no ciclo reprodutivo do fungo, resultando na inibição total (100%) da formação de novos escleródios. Este resultado possui elevada relevância agrônômica, uma vez que os escleródios representam as estruturas de resistência que permitem a sobrevivência do patógeno no solo por longos períodos.

Para validar a segurança da tecnologia na cultura alvo, foram conduzidos testes em plantas de soja (*Glycine max*) cultivadas em casa de vegetação. Utilizando um solo de baixa fertilidade (pH 5,8) e uma dosagem de $2,35 \times 10^{11}$ NPs/m², as análises efetuadas aos 25 dias de cultivo (estágio vegetativo inicial) mostraram que as NPFe são biocompatíveis. Não foram registrados prejuízos nos teores de clorofila, nas trocas gasosas ou no crescimento radicular, tendo-se observado, inclusive, um incremento na área foliar das plantas tratadas. A ausência de fitotoxicidade e de danos genotóxicos foi ratificada por testes de germinação em sementes de feijão, lentilha e tomate, bem como pelo ensaio de *Allium cepa*, consolidando estas nanopartículas como uma alternativa segura para o manejo biotecnológico na agricultura (Bilesky-José, 2020).

2.6.4. Potencial pró-oxidante e reação de Fenton

Conforme alertado por Santás-Miguel et al. (2023), o ferro em excesso pode atuar como um agente pró-oxidante via reação de Fenton, catalisando a produção exacerbada de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs):



O radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$) gerado é extremamente reativo e capaz de oxidar lipídios de membrana, proteínas e DNA. Esse desequilíbrio redox resulta em peroxidação lipídica (quantificada pelo aumento de malondialdeído, MDA), danos às membranas celulares e comprometimento da integridade proteica.

Na soja, a fronteira entre o benefício nutricional e o estresse oxidativo induzido por ferro é definida por múltiplos fatores: concentração aplicada, tempo de exposição, estabilidade coloidal da NP e status fisiológico da planta. Embora o Fe_2O_3 nanoestruturado seja um potente aliado da produtividade e da sanidade vegetal, como demonstrado nos incrementos de 48% na produtividade (Sheykhbaglou et al., 2010) e na redução de 60% na severidade de *Fusarium* (GUO et al., 2025), sua aplicação exige precisão para evitar que o suporte nutricional se torne um fator de estresse oxidativo secundário.

A janela de eficácia do ferro nanoestruturado é, portanto, duplamente restrita: na extremidade inferior, doses insuficientes não suprem a demanda metabólica; na extremidade superior, o excesso sobrecarrega os sistemas de compartimentalização (vacúolos, fitoquelatinas) e desencadeia a reação de Fenton no citosol. Este equilíbrio crítico constitui um dos principais desafios para a consolidação de protocolos seguros e reprodutíveis com NPs de Fe_2O_3 na cultura da soja.

2.7. Hormese e dualidade funcional

2.7.1. Fundamentos da resposta bifásica

A relação entre a concentração de uma nanopartícula e seu efeito biológico raramente é linear. O padrão predominante é descrito pela teoria da hormese, que postula uma curva de resposta bifásica: baixas doses de um agente potencialmente estressor estimulam respostas adaptativas benéficas (zona de estimulação), enquanto doses progressivamente mais altas suprimem essas respostas e induzem toxicidade (zona de inibição) (Calabrese; Mattson, 2017). Na nanotecnologia agrícola, esta dualidade se materializa na transição entre a função de nanofertilizante e a de indutor de estresse oxidativo.

A análise das NPs de ZnO e Fe_2O_3 na soja exige, portanto, uma visão integradora: o sucesso agrônômico depende da sincronia entre as propriedades físico-químicas do material (tamanho, morfologia, concentração) e a janela fisiológica da cultura. Estudos de mapeamento indicam que a ativação de sistemas antioxidantes pode ser interpretada de duas formas: fortalecimento (mecanismo de proteção que prepara a soja para estresses futuros) ou resposta

adaptativa (reação direta ao estresse provocado pela própria nanopartícula). Segundo Javed et al. (2024), essa "fronteira" é definida pela relação dose-resposta.

Apesar do potencial das nanopartículas de Fe_2O_3 e ZnO , a literatura ainda carece de investigação padronizada. Esse cenário de fragmentação, somado ao antagonismo iônico clássico descrito por Franco e Loomis (1948), que impunha intervalos de espera de até 96 horas devido ao sequestro de ferro pelo fósforo, dificulta a consolidação de protocolos replicáveis. A transição para uma agricultura sustentável e inteligente exige a superação desses gargalos através da digitalização e da geração de dados precisos, permitindo que as propriedades de liberação gradual das nanopartículas sejam exploradas de forma estratégica (Massruhá et al., 2020; Hanif et al., 2024).

2.7.2. Biomarcadores, limiares críticos e modulação ambiental

A resposta bifásica da soja às nanopartículas de ZnO e Fe_2O_3 pode ser monitorada por um conjunto de biomarcadores que, em conjunto, permitem situar a planta na curva hormética, seja na zona de estimulação, seja na zona de estresse ou inibição.

Na zona de estimulação, os biomarcadores sinalizam incremento funcional e metabólico. Em soja tratada com NPFe_2O_3 (15-20 nm, 50 mg/L, via foliar), Guo et al. (2025) reportaram aumento de 43,78% no teor de clorofila e 54,28% na biomassa radicular, associados à elevação de 45,59% na atividade da SOD. De forma análoga, Hanif et al. (2024) demonstraram que NPZnO (38-59 nm) aplicadas via solo na dose de 120 mg/kg promovem incremento significativo na atividade das enzimas SOD, CAT e POX, além de ganhos em biomassa e teor de clorofila. Este perfil caracteriza a ativação do metabolismo primário e do sistema antioxidante como mecanismo adaptativo e protetivo.

Em contraste, a transição para a zona de estresse é marcada pela sobrecarga dos sistemas de compartimentalização e pela geração exacerbada de espécies reativas de oxigênio (EROs). Hanif et al. (2024) estabelecem um limiar crítico para soja: na dose de 400 mg/kg de NPZnO (38-59 nm), observa-se reversão do benefício, com inibição do crescimento radicular, redução da biomassa total e elevação dos níveis de malondialdeído (MDA), biomarcador direto de peroxidação lipídica das membranas.

Doses extremas amplificam os danos. López-Moreno et al. (2010 apud Siddiqi; Husen, 2017) reportaram que NPZnO de apenas 8 nm, aplicadas em concentrações de 2000 a 4000 mg/L, induzem genotoxicidade em raízes de soja, evidenciada por alterações no perfil de bandas de DNA (RAPD). Paralelamente, Peralta-Videa et al. (2014 apud Siddiqi; Husen, 2017) demonstraram que NPZnO de 10 nm na dose de 500 mg/kg provocam redução nos teores de

Fe, Mg e K, um efeito antagônico que compromete o balanço nutricional da cultura. Yoon et al. (2014 apud Siddiqi; Husen, 2017), na mesma dose (500 mg/kg) com partículas <50 nm, observaram redução no comprimento de raízes e brotos, menor área superficial e volume radicular, culminando na interrupção total da formação de sementes.

A ambiguidade interpretativa dos biomarcadores antioxidantes é ilustrada por Javed et al. (2024): a elevação da atividade de SOD e CAT pode representar tanto fortalecimento adaptativo **quanto** resposta a dano celular iminente. O contexto experimental, dose, via, morfologia da NP, status hídrico e nutricional da planta, é determinante para distinguir uma condição da outra.

Esta ambiguidade fica evidente no contraste entre dois estudos com nanocondicionamento de sementes. Melazzo (2025), trabalhando com soja e NPZnO de 20 nm via seca (200 mg/kg), observou manutenção do vigor germinativo e da qualidade fisiológica durante o armazenamento, com efeito fungistático adicional sobre *Aspergillus* spp. e *Penicillium* spp. Em contrapartida, Garcia (2025), em tomateiros submetidos a nanocondicionamento úmido com NPZnO (6 mg/mL) sob estresse hídrico simulado (-0,3 MPa), reportou comprometimento do vigor e da uniformidade de germinação, com redução significativa do comprimento radicular e da parte aérea. A mesma nanopartícula (ZnO, 20 nm), portanto, produziu respostas opostas em função da via de aplicação, da concentração, da espécie e da presença de estresse concomitante.

A precisão na dosagem é o fator crítico que separa o potencial funcional da fitotoxicidade na soja. Dados compilados por Hanif et al. (2024) estabelecem limiares claros para o uso de ZnO NPs (38–59 nm) via solo: 120 mg/kg atua como promotor de crescimento; 400 mg/kg reverte o benefício. No caso do ferro, embora limiares quantitativos específicos para soja não estejam consolidados, Sheykhbaglou et al. (2010 apud Siddiqi; Husen, 2017) demonstraram que 1,0 g/L de NPFe₂O₃ via foliar incrementou a produtividade em 48%, enquanto Santás-Miguel et al. (2023) alertam que o excesso de ferro catalisa a reação de Fenton, gerando estresse oxidativo.

A resposta hormética não é determinada apenas pela dose e pelo tamanho da partícula, o contexto ambiental atua como modulador crítico. Ramos e Rocha (2024) demonstraram que a mesma dose de NPZnO (10 mg/L, 20 nm, via foliar) que foi bioestimulante sob irrigação plena (100% ETc) foi insuficiente para mitigar danos sob estresse hídrico severo (50% ETc). De forma análoga, a mesma dose de NPFe (30 nm, 10 mg/L) que elevou a produção sob irrigação plena não foi capaz de mitigar os danos fisiológicos sob déficit severo. A severidade do estresse hídrico anula os potenciais benefícios produtivos e metabólicos das nanopartículas,

demonstrando que a bioestimulação nanoestruturada depende da homeostase hídrica da cultura como pré-condição para sua eficácia.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Mapear e sistematizar as evidências científicas acerca dos efeitos de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de ferro (Fe₂O₃) na cultura da soja (*Glycine max L.*), analisando sua dupla funcionalidade sob a perspectiva fisiológica e agronômica.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar e caracterizar os principais delineamentos experimentais utilizados nos estudos envolvendo ZnO e Fe₂O₃ nanoparticulados aplicados à soja.
- Analisar os efeitos fisiológicos associados à aplicação dessas nanopartículas, com ênfase em crescimento, atividade fotossintética, sistema antioxidante e fixação biológica de nitrogênio.
- Comparar as condições experimentais, incluindo dose, via de aplicação e estágio fenológico, associadas a respostas benéficas ou fitotóxicas.
- Avaliar evidências relacionadas à produtividade, qualidade nutricional dos grãos e possíveis impactos na microbiota do solo.
- Organizar critérios descritivos que permitam diferenciar efeitos nutricionais de efeitos indutores de estresse na literatura científica.

4 METODOLOGIA

O presente estudo consiste em uma revisão de escopo, conduzida com o objetivo de mapear, caracterizar e sistematizar a produção científica acerca dos efeitos de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de ferro (Fe₂O₃) na cultura da soja (*Glycine max L.*), com ênfase em respostas ecofisiológicas e implicações agronômicas.

A revisão de escopo foi escolhida por se tratar de um método adequado para investigar áreas de pesquisa emergentes, caracterizadas por heterogeneidade metodológica, diversidade de abordagens experimentais e ausência de padronização quanto a doses, vias de aplicação e parâmetros avaliados. Diferentemente de revisões sistemáticas com meta-análise, este delineamento visa mapear evidências disponíveis, identificar padrões de resposta e lacunas de conhecimento, sem estimativa quantitativa de efeito.

A condução metodológica seguiu as diretrizes do *Joanna Briggs Institute* para revisões de escopo, e o relato foi estruturado conforme as recomendações do checklist PRISMA-ScR (Aramataris et al., 2024; Tricco et al., 2018).

O protocolo do estudo foi previamente registrado na *Open Science Framework*, sob o DOI 10.17605/OSF.IO/BYDSJ, garantindo transparência, rastreabilidade e reprodutibilidade das etapas metodológicas. A versão completa do protocolo encontra-se disponibilizada no Anexo deste trabalho.

A revisão foi orientada pelas seguintes questões norteadoras:

1. Como os estudos caracterizam e diferenciam as funções nutricional e indutora de estresse das nanopartículas de ZnO e Fe₂O₃ na cultura da soja?
2. Quais condições experimentais (como faixa de concentração, dose e via de aplicação) estão associadas à transição entre efeitos benéficos e fitotóxicos?
3. Que critérios podem ser propostos para organizar a descrição dessa dupla funcionalidade na literatura científica?

Os critérios de elegibilidade foram definidos com base na estratégia PCC (População, Conceito e Contexto), conforme recomendado pelo JBI, acrescida do elemento Tipos de Fontes de Evidência (Tabela 4). Não foi aplicado recorte temporal, visando captar o máximo da produção científica disponível, incluindo estudos pioneiros.

Tabela 4. Critérios de elegibilidade.

Elemento	Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
População (P)	Soja (<i>Glycine max</i> L.), em qualquer estágio de desenvolvimento.	Outras espécies vegetais.
Conceito (C)	Nanopartículas (NPs) de óxido de zinco (ZnO) e/ou óxido de ferro (Fe ₂ O ₃ , incluindo hematita e magnetita), com tamanho ≤ 100 nm. Serão incluídos estudos que informem o tamanho das NPs e descrevam o método de síntese utilizado.	Outras nanopartículas; partículas > 100 nm; formulações não caracterizadas; estudos que não informem tamanho ou método de síntese.
Contexto (C)	Experimentos que avaliem efeitos relacionados à nutrição (ex.: absorção, eficiência) e/ou efeitos relacionados a estresse/fitotoxicidade (ex.: estresse oxidativo, danos morfológicos).	Estudos sem foco na dualidade nutrição/estresse; estudos puramente conceituais ou sem dados experimentais extraíveis.
Fontes	Artigos científicos originais, teses e dissertações completas.	Resumos sem dados, patentes ou materiais comerciais
Idioma	Inglês e Português.	Outros idiomas.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Web of Science, Scopus e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. A estratégia combinou descritores relacionados à cultura da soja e às nanopartículas de ZnO e Fe₂O₃, utilizando operadores booleanos para ampliar a sensibilidade da busca. Foram consideradas variações terminológicas relacionadas às nanopartículas, incluindo diferentes nomenclaturas e formas químicas.

O processo de seleção seguiu as etapas recomendadas pelo PRISMA-ScR: identificação, remoção de duplicatas, triagem, avaliação de elegibilidade e inclusão. A busca inicial resultou em 275 registros. Após remoção de duplicatas, restaram 223 estudos para triagem. Na etapa de triagem por título e resumo, 148 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios PCC, restando 75 estudos potencialmente elegíveis. A triagem por título e resumo seguiu procedimento inspirado nas recomendações do Cochrane Rapid Reviews Methods Group (Garrity et al., 2021), com amostra aleatória de 20% dos registros avaliada de forma independente por dois revisores e verificação posterior de todas as exclusões. Os 75 artigos foram submetidos à leitura integral e avaliados quanto ao atendimento rigoroso dos critérios PCC. Nessa etapa, 46 estudos foram excluídos, principalmente por ausência de informação sobre tamanho das nanopartículas, não descrição do método de síntese ou uso de partículas acima de 100 nm. Ao final, 29 estudos atenderam integralmente aos critérios e compuseram a amostra final da revisão. O processo completo de identificação e seleção dos estudos encontra-se apresentado na Figura 6.

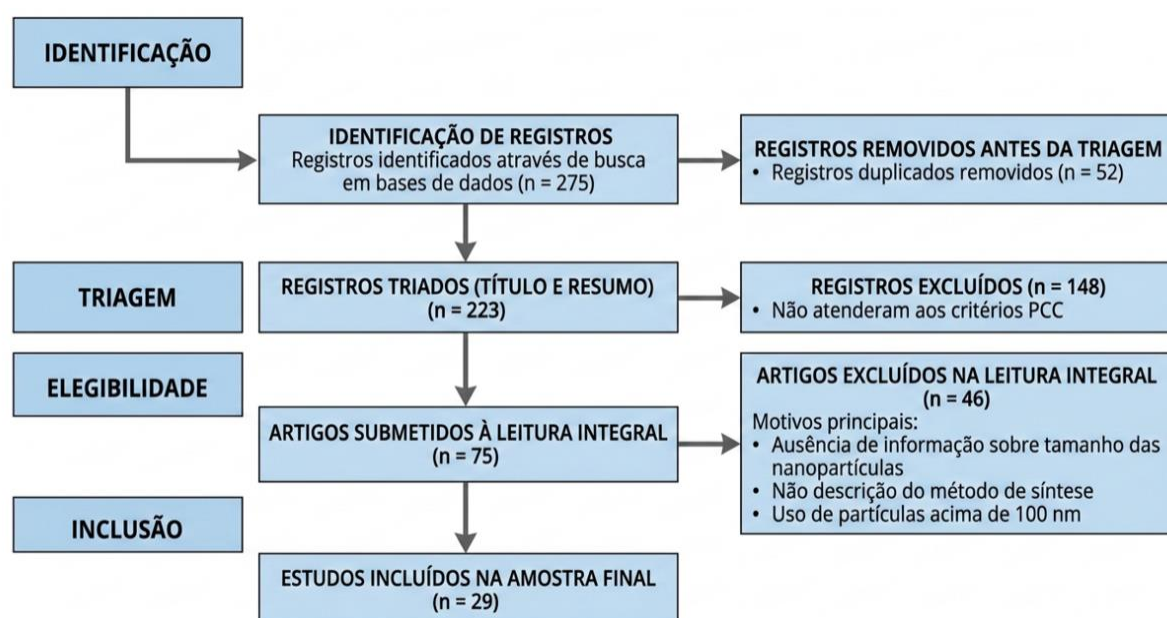


Figura 6. Fluxograma do processo de identificação, triagem e seleção dos estudos incluídos na revisão de escopo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Os dados dos estudos incluídos foram extraídos manualmente e organizados em planilha eletrônica no software Microsoft Excel. A extração foi conduzida de forma padronizada, garantindo consistência na categorização das variáveis e permitindo a organização temática dos resultados segundo tipo de nanopartícula, condição experimental e resposta fisiológica.

Buscando assegurar rigor metodológico e reduzir potenciais vieses, foram adotadas estratégias de padronização em todas as etapas da revisão. A definição prévia e registro público do protocolo na Open Science Framework garantiram transparência e evitaram modificações oportunísticas nos critérios de elegibilidade ao longo do processo. A triagem e seleção dos estudos foram conduzidas com base em critérios explícitos fundamentados na estratégia PCC, minimizando decisões subjetivas. A utilização da plataforma Rayyan permitiu organização sistemática dos registros e rastreabilidade das exclusões. Além disso, a exigência de informações técnicas obrigatórias, como tamanho das nanopartículas e método de síntese, contribuiu para reduzir heterogeneidade não controlada e fortalecer a consistência analítica.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização metodológica dos estudos incluídos

5.1.1 Distribuição temporal das publicações

Os 29 estudos incluídos nesta revisão foram publicados entre 2010 e 2026, apresentando um crescimento progressivo do interesse científico na aplicação de nanopartículas de ZnO e Fe₂O₃ na cultura da soja ao longo da última década. Observou-se baixa frequência de publicações no período entre 2010 e 2014, seguido por aumento gradual entre 2015 e 2019 (Figura 7).

A maior concentração de estudos foi registrada a partir de 2020, período que concentrou a maioria das publicações analisadas acumulando 16 estudos entre os anos de 2020 e 2024. Esse aumento recente sugere intensificação das pesquisas voltadas ao uso de nanomateriais na agricultura, especialmente no contexto de nutrição mineral, mitigação de estresses abióticos e aumento de produtividade.

O padrão temporal observado indica que a temática ainda se encontra em expansão, com produção científica crescente nos últimos cinco anos, refletindo consolidação do campo e ampliação do interesse na aplicação agrônômica de nanopartículas.

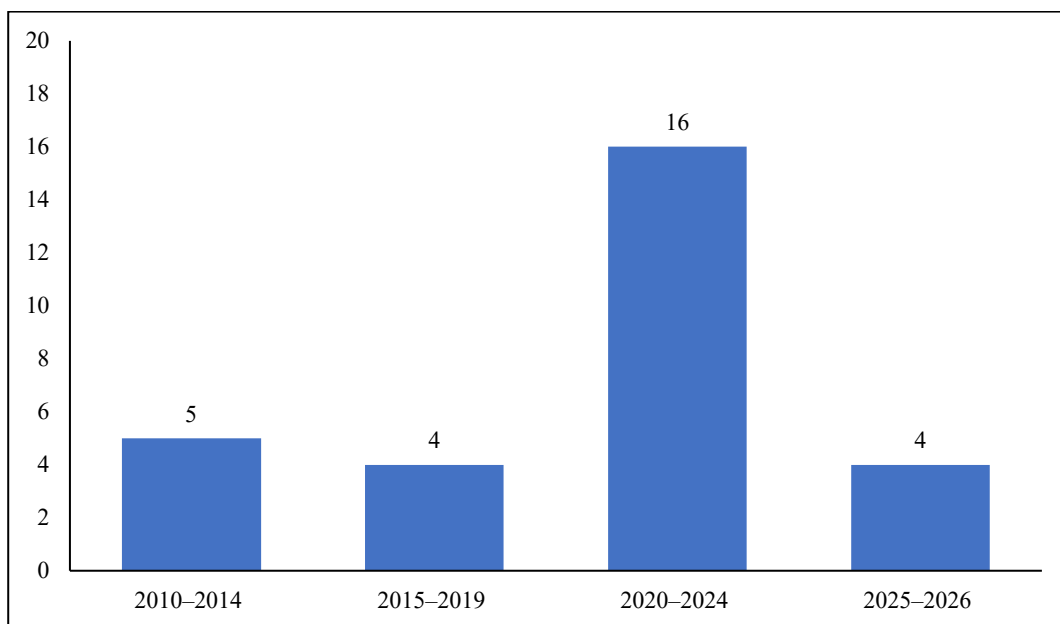


Figura 7. Distribuição temporal dos estudos incluídos (n=29)

Fonte: Autor (2026)

5.1.2 Tipo e tamanho das nanopartículas utilizadas

Entre os 29 estudos incluídos, observou-se predominância expressiva do uso de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO), presentes em 23 artigos. As nanopartículas de óxido de ferro (Fe_2O_3) foram empregadas em 7 estudos. Em um único caso, as duas nanopartículas foram avaliadas conjuntamente no mesmo delineamento experimental, porém essa abordagem foi minoritária dentro do conjunto analisado (Tabela 5).

Quanto ao tamanho primário das nanopartículas, verificou-se variação aproximada entre 5 nm e 60 nm, com maior concentração na faixa de 10 a 40 nm. A maioria dos estudos utilizou partículas inferiores a 50 nm, atendendo ao critério conceitual adotado nesta revisão para definição de nanopartícula (Tabela 5).

Tabela 5. Tamanho e tipo de nanopartículas encontrados nos estudos analisados

Autor	Ano	Tipo de nanopartícula	Tamanho da nanopartícula
Alidoust & Isoda	2013	Óxido de ferro (IONPs) com/sem citrato	6 nm
Basit et al.	2023	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	15–30 nm
Bhat et al.	2022a	Nanopartículas de óxido de ferro (Fe_2O_3 -NPs)	~47 nm
Bhat et al.	2022b	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	46 nm
Chen et al	2023	Óxido de zinco (ZnO) e Óxido de zinco sulfetado (s-ZnO)	25 nm
Ernst et al.	2024	ZnO-NPs e ZnSi-bio (biosílica)	Até 100 nm
Ernst et al.	2024b	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	< 100 nm

Autor	Ano	Tipo de nanopartícula	Tamanho da nanopartícula
Gam et al.	2025	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	27–48 nm
Gomes	2021	Nanopartículas de óxido de zinco (nano ZnO)	60 nm
Guo et al.	2025	Nanopartículas de Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	20 nm
Hashemi et al.	2019	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	~41 nm
Hossain et al.	2016	Al ₂ O ₃ , ZnO e AgNPs	15–60 nm
Jia et al.	2025	\$ TiO ₂ NPs e ZnONPs	5–30 nm
Montanha et al.	2020	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO)	40 nm
Moreno et al.	2010	Nanopartículas de ZnO e CeO ₂	ZnO: 8 nm (hexagonal); CeO ₂ : 7 nm (cúbica)
Naghani et al.	2024	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	20 nm
Perez et al.	2019	NPs de Ag, B, CeO ₂ , CuO, MnO ₂ , MoO ₃ , SiO ₂ , TiO ₂ e ZnO	10–100 nm
Priester et al.	2017	CeO ₂ NPs e ZnONPs	8–10 nm
Priester et al.	2012	CeO ₂ NPs e ZnONPs	8–10 nm
Tanha et al.	2023	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	38 nm a > 500 nm
Tanha et al.	2022	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	38 nm a >500 nm
Tanha et al.	2020	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	38 nm a >500 nm
Videa et al.	2014	Óxido de Cério (CeO ₂) e Óxido de Zinco (ZnO)	\$CeO_{2}\$ (8 nm) e ZnO (10 nm)
Yadav et al.	2024	ZnO e Fe ₂ O ₃ NPs	ZnO: ~13,2 nm; Fe ₂ O ₃ : ~15 nm
Yang et al.	2020	Fe ₂ O ₃ revestidas com ácido fúlvico (FA)	5 nm
Yoon et al.	2014	Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs)	< 50 nm
Zeeshan et al.	2021	ZnO-NPs e Se-NPs	20 nm
Zhang & Liu	2024	Nanopartículas de óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	18 - 22 nm (média 20 nm)
Zhang et al.	2025	Nanocompósito Fe ₂ O ₃ /g-C ₃ N ₄ (FC)	30 nm

Observou-se, entretanto, heterogeneidade na forma de reporte do tamanho. Em parte dos estudos, a dimensão foi confirmada por métodos como microscopia eletrônica de transmissão, enquanto em outros casos os valores foram informados com base nas especificações do fabricante, sem detalhamento adicional sobre o procedimento de determinação. Ainda assim, todos os artigos incluídos apresentaram nanopartículas dentro da escala nanométrica definida no protocolo.

5.1.3 Origem, método de síntese e caracterização físico-química das nanopartículas

Quanto à origem das nanopartículas empregadas nos estudos analisados, verificou-se distribuição relativamente equilibrada entre materiais comerciais e nanopartículas sintetizadas em laboratório. Das 29 publicações incluídas, 16 utilizaram nanopartículas comerciais adquiridas de fornecedores especializados, incluindo empresas como a Meliorum Technologies.

Por outro lado, 13 estudos relataram síntese laboratorial própria, empregando diferentes rotas físico-químicas e biogênicas. Entre os métodos identificados destacam-se síntese hidrotérmica, precipitação química, método químico úmido, sol-gel associado à moagem de bolas, síntese verde com extratos vegetais, síntese biogênica e técnicas de auto-montagem eletrostática (Tabela 6).

A caracterização físico-química das nanopartículas apresentou considerável variabilidade entre os estudos analisados. Dos 29 artigos incluídos, 24 realizaram algum tipo de caracterização própria das nanopartículas, enquanto 5 estudos utilizaram exclusivamente dados fornecidos pelo fabricante, sem descrição de análises experimentais adicionais (Tabela 6).

Entre as técnicas mais empregadas destacaram-se a difração de raios X (XRD), utilizada em 15 estudos, e a microscopia eletrônica de transmissão (TEM), presente em 12 publicações. A microscopia eletrônica de varredura (SEM ou FE-SEM) foi utilizada em 10 estudos, enquanto a análise por espalhamento dinâmico de luz (DLS) foi relatada em 8 artigos. A determinação do potencial zeta, importante para avaliação da estabilidade coloidal das nanopartículas, foi descrita em 5 estudos (Tabela 6).

Tabela 6. Método de síntese a caracterização das nanopartículas encontrados nos estudos.

Autor	Ano	Método de síntese	Métodos de caracterização das NPs
Alidoust & Isoda	2013	nanopartículas comerciais	Microscopia óptica
Basit et al.	2023	nanopartículas comerciais	TEM
Bhat et al.	2022a	Método hidrotérmico modificado	XRD, SEM, EDAX, Raman, UV, PL
Bhat et al.	2022b	Método hidrotérmico modificado	XRD, SEM, EDAX, Raman, UV, PL, XPS
Chen et al	2023	Método químico úmido; envelhecimento para forma ZnS	TEM, DLS, SEM-EDX, XRD
Ernst et al.	2024	nanopartículas comerciais	Não realizado
Ernst et al.	2024b	nanopartículas comerciais	SEM, EDS, XRD, DLS
Gam et al.	2025	Síntese verde (extrato de laranja)	SEM, EDS, TEM, ATR FT-IR, XRD
Gomes	2021	nanopartículas comerciais	XRD, SEM, DLS
Guo et al.	2025	nanopartículas comerciais	TEM, DLS, Potencial Zeta
Hashemi et al.	2019	Síntese verde (Oliva)	UV-Vis, XRD, TEM
Hossain et al.	2016	Síntese química	TEM, BET
Jia et al.	2025	nanopartículas comerciais	DLS, Potencial Zeta, TEM

Autor	Ano	Método de síntese	Métodos de caracterização das NPs
Montanha et al.	2020	nanopartículas comerciais	Laser Particle Sizer, SEM
Moreno et al.	2010	comercial (Adquiridas da Meliorum Technologies)	XRD, ICP-OES
Naghani et al.	2024	nanopartículas comerciais	TEM, XRD, DLS
Perez et al.	2019	nanopartículas comerciais	DLS, Potencial Zeta, TEM
Priester et al.	2017	nanopartículas comerciais	Não realizado; dados do fabricante
Priester et al.	2012	nanopartículas comerciais	Não realizado; dados do fabricante
Tanha et al.	2023	Moagem de bolas e Sol-gel	XRD, FE-SEM
Tanha et al.	2022	Sol-gel e moinho de bolas	XRD, FE-SEM, DLS, Potencial Zeta
Tanha et al.	2020	Moagem e Sol-gel	XRD, FE-SEM, DLS, Potencial Zeta
Videa et al.	2014	Adição em pó ao solo (comercial Meliorum Technologies)	Não realizado; dados do fabricante
Yadav et al.	2024	Precipitação e Hidrotérmico	UV-Vis, TEM
Yang et al.	2020	Adsorção física	Não realizado; dados do fabricante
Yoon et al.	2014	nanopartículas comerciais	TEM, ICP-AES
Zeeshan et al.	2021	nanopartículas comerciais	XRD, SEM, EDS
Zhang & Liu	2024	método de precipitação química	TEM, XRD, FTIR, SEM, análise elementar
Zhang et al.	2025	Auto-montagem eletrostática	XRD, TEM, BET, FTIR, DLS, XPS

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Técnicas complementares como espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia UV-Vis, BET, ICP-OES, Raman, XPS e análises elementares também foram empregadas em menor frequência.

Observa-se que, embora a maioria dos estudos tenha realizado algum tipo de caracterização físico-química, não houve padronização quanto às técnicas utilizadas, havendo ampla heterogeneidade metodológica na avaliação das propriedades das nanopartículas.

5.1.5 Condições experimentais e estágio fenológico

As condições experimentais adotadas nos estudos analisados mostraram predominância de ensaios conduzidos em ambientes controlados. Dos 29 artigos incluídos, 24 foram realizados sob condições controladas, incluindo vasos em casa de vegetação ou estufa, câmaras climatizadas, sistemas hidropônicos e cultivo in vitro. Essa abordagem permitiu maior controle das variáveis ambientais e do regime de aplicação das nanopartículas.

Ensaios conduzidos em condições naturais ou ao ar livre foram menos frequentes, correspondendo a 5 estudos. Esses experimentos incluíram avaliações em campo, microcosmos e mesocosmos ao ar livre, representando menor proporção da evidência disponível (Tabela 7).

A análise dos estágios fenológicos avaliados nos estudos incluídos demonstrou predominância de experimentos concentrados nas fases iniciais do desenvolvimento da soja. Aproximadamente 7 estudos investigaram efeitos das nanopartículas durante a germinação e

fase de plântula, geralmente em períodos curtos de exposição, variando de 2 dias a 35 dias após a germinação (Tabela 7).

A fase vegetativa foi abordada em 7 estudos, incluindo avaliações nos estágios V1 a V7 ou em períodos definidos em dias após a semeadura. Outros 3 estudos acompanharam o desenvolvimento desde fases vegetativas até estágios reprodutivos intermediários (Tabela 7).

Avaliações exclusivamente em estágios reprodutivos, como florescimento, formação de vagens e maturidade, foram menos frequentes, totalizando 4 estudos. Apenas 8 publicações conduziram experimentos até o ciclo completo da cultura, incluindo estágios R5 e R6 ou avaliações com duração aproximada de 120 dias (Tabela 7).

A maioria dos estudos concentrou-se em fases iniciais ou intermediárias do desenvolvimento da soja, sendo relativamente limitada a quantidade de pesquisas que acompanharam a cultura até o ciclo completo e análise final de produção.

Tabela 7. Condições experimentais e estágio fenológico dos estudos analisados

Autor	Ano	Estágio fenológico	Concentração	Via de aplicação	Local experimental
Alidoust & Isoda	2013	Germinação a pré-florescimento	50 a 2.000 mg/L	Foliar e Solo	Vasos e incubadora
Basit et al.	2023	Plântulas (2 semanas)	0 a 100 mg/L	Foliar	Estresse por Cromo (100 μ M Cr) em solução
Bhat et al.	2022a	Vegetativo (35 DAS)	1000 mg/L	Foliar	Toxicidade por arsênio (100 μ M NaAsO ₂ via solo)
Bhat et al.	2022b	Plântulas (30-35 DAS)	150 mg/L	Foliar	Cultivo em vasos com solo exposto a 50 μ M de arsênio
Chen et al.	2023	Vegetativo (70 dias)	0 a 500 mg/kg	Solo	Solo de fazenda em vasos (casa de vegetação)
Ernst et al.	2024	Estágios V2 até R7	10 mg/L (ZnO)	Foliar	Campo (Eslováquia)
Ernst et al.	2024b	Início da inflorescência	1,4 a 140 mg/L	Foliar	Campo (Fluvisol)
Gam et al.	2025	Estágio V1	1000 mg/L	Foliar e Solo	Estresse por Cádmio (100 μ M Cd)
Gomes	2021	Estágio V3, V5, V7 e R2	2.300 mg/L; 100 g/ha por aplicação (total 300 g/ha)	Foliar	Aplicação de gotas na nervura da folha (abaxial), umidade 80%; Solução nutritiva de Hoagland (hidroponia) em casa de vegetação
Guo et al.	2025	Estágios V1, V3 e V4	10, 50, 100 e 500 mg/L	Foliar (aspersão)	Vasos com inóculo de <i>Fusarium oxysporum</i>
Hashemi et al.	2019	Plântula (21 dias)	200 e 400 ppm	Solução nutritiva	Cultivo in vitro
Hossain et al.	2016	Plântula (7 dias)	500 ppm (Al ₂ O ₃ NPs/ZnONPs); 50 ppm (AgNPs)	Solução nutritiva (hidroponia)	Câmara climatizada (3 dias de exposição)
Jia et al.	2025	Germinação e Estágio V5	50 a 500 mg/L	Seed priming	Estresse por cádmio em solo e substrato
Montanha et al.	2020	Germinação e plântulas	4 mg Zn/kg semente	Tratamento de sementes	Vasos com solo arenoso, sala de crescimento

Autor	Ano	Estágio fenológico	Concentração	Via de aplicação	Local experimental
Moreno et al.	2010	Germinação e plântula (5 dias)	500 a 4000 mg/L	Solução nutritiva	Estudo em ambiente escuro (5 dias)
Naghani et al.	2024	Florescimento	50 a 200 mg Zn/L	Foliar	Campo (vasos, solo com baixo Zn)
Perez et al.	2019	Estágio V3	500 ou 1000 µg/mL	Foliar (pulverização/imersão)	Infestação por <i>Fusarium virguliforme</i>
Priester et al.	2017	Ciclo completo (até R5-R6)	ZnONPs (0,05–0,5 g/kg); CeO ₂ NPs (0,1–1,0 g/kg)	Solo	Solo arenoso-argiloso em casa de vegetação
Priester et al.	2012	Ciclo completo (até R5)	ZnONPs e CeO ₂ NPs (várias doses)	Solo	Solo de fazenda orgânica em vasos
Tanha et al.	2023	Ciclo completo (120 dias)	0 a 500 mg/kg	Solo	Microcosmo ao ar livre
Tanha et al.	2022	Ciclo completo (120 dias)	0 a 500 mg/kg	Solo	Solo calcário semiárido
Tanha et al.	2020	Ciclo completo (120 dias)	0 a 400 mg Zn/kg	Solo	Mesocosmo ao ar livre, solo franco-siltoso
Videa et al.	2014	Produção de vagens (48 dias)	nZnO (50-500 mg/kg); nCeO ₂ (100-1000 mg/kg)	Solo	Casa de vegetação
Yadav et al.	2024	Floração e maturidade	25 mg/kg	Solo	Solo alcalino em região semiárida
Yang et al.	2020	Maturidade (8 semanas)	15 a 60 mg/vaso	Foliar ou Solo	Solo alcalino em vasos
Yoon et al.	2014	Ciclo completo (R6)	50 e 500 mg/kg	Solo	Microcosmo OECD em casa de vegetação
Zeeshan et al.	2021	Plântulas Estágio V2	25 µM (ZnO NPs)	Solução nutritiva	Estresse por arsênio (AsV) em hidroponia
Zhang & Liu	2024	Vegetativo (30 dias)	0,4 % a 1,2 %	Solo	Experimento em vasos
Zhang et al.	2025	Fase vegetativa (60 dias)	10, 100 e 200 mg/kg	Solo	Vasos em casa de vegetação

5.2 Efeitos das nanopartículas no desenvolvimento e na fisiologia da soja

Os efeitos das nanopartículas na fase de germinação e estabelecimento inicial da soja mostraram predominância de respostas estimuladoras em baixas concentrações. Diversos estudos relataram aumento na taxa de germinação, maior vigor de plântulas e incremento no desenvolvimento inicial do sistema radicular, especialmente quando as nanopartículas foram aplicadas via *priming* de sementes ou em doses reduzidas.

Observou-se ainda aumento no alongamento radicular e melhoria da biomassa inicial, indicando possível efeito benéfico na absorção de água e nutrientes durante os primeiros dias após a germinação. Em alguns casos, o tratamento com nanopartículas promoveu maior atividade metabólica inicial, refletida em melhor desempenho fisiológico nas plântulas.

Foram relatados efeitos negativos em concentrações elevadas, incluindo redução do crescimento radicular, lignificação e diminuição do desenvolvimento inicial. Também houve registros de ausência de efeito significativo em determinadas doses e condições experimentais, indicando que a resposta depende fortemente da concentração aplicada e do tipo de nanopartícula.

Quanto aos efeitos das nanopartículas sobre o crescimento vegetativo da soja foram amplamente relatados nos estudos analisados, com predominância de respostas estimuladoras em condições controladas e em doses moderadas. Observou-se aumento significativo da biomassa aérea e radicular em diversos experimentos, além de melhorias nos índices de desenvolvimento vegetativo e maior vigor das plantas tratadas.

No que se refere ao sistema radicular, vários estudos relataram incremento no comprimento de raízes, aumento da biomassa radicular e melhorias na arquitetura do sistema radicular, incluindo maior ramificação e desenvolvimento lateral. Esse efeito foi associado à maior capacidade de absorção de nutrientes e à modulação positiva de mecanismos fisiológicos relacionados ao crescimento.

Entretanto, houve estudos que observaram redução do crescimento radicular e inibição do desenvolvimento vegetativo em concentrações elevadas de nanopartículas, indicando possível efeito fitotóxico dependente de dose. Também foram observadas alterações na estrutura radicular e sinais de estresse oxidativo em condições de alta exposição.

As nanopartículas, especialmente de ZnO, tendem a promover crescimento vegetativo e desenvolvimento radicular quando aplicadas em concentrações adequadas, embora a resposta seja altamente dependente da dose, do tipo de nanopartícula e das condições experimentais.

Os parâmetros fotossintéticos foram amplamente investigados nos estudos analisados, sendo um dos desfechos fisiológicos mais frequentemente avaliados. A maioria das publicações relatou aumento do teor de clorofila, melhoria da taxa fotossintética e maior eficiência do uso da água, especialmente em condições de estresse abiótico.

Estudos observaram incremento na concentração de pigmentos fotossintéticos, incluindo clorofila a, clorofila b e carotenoides, associado à maior atividade fotossintética e melhoria na condutância estomática. Em situações de estresse por metais como arsênio, cromo e cádmio, a aplicação de nanopartículas foi associada à restauração da atividade fotossintética e à redução de marcadores de dano oxidativo, como MDA e peroxidação lipídica.

Em experimentos envolvendo estresse hídrico, verificou-se aumento do conteúdo relativo de água e manutenção da integridade funcional do aparato fotossintético, sugerindo papel das nanopartículas na mitigação do estresse oxidativo.

Alguns estudos relataram redução do teor de clorofila e aumento da peroxidação lipídica em concentrações elevadas, indicando possível efeito fitotóxico quando ultrapassados determinados limiares de dose. Em especial, aplicações em altas concentrações resultaram em diminuição da eficiência fotossintética e aumento de estresse oxidativo. As nanopartículas podem atuar como moduladoras positivas da atividade fotossintética e da síntese de pigmentos em condições adequadas de aplicação, embora efeitos adversos possam ocorrer em concentrações elevadas.

A modulação do sistema antioxidante foi um dos mecanismos fisiológicos mais frequentemente associados aos efeitos das nanopartículas na soja. Diversos estudos relataram aumento da atividade de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD), ascorbato peroxidase (APX) e glutathione peroxidase (GPX), especialmente sob condições de estresse abiótico.

Em situações de toxicidade por arsênio, cromo e cádmio, a aplicação de nanopartículas foi associada à redução de marcadores de estresse oxidativo, como malondialdeído (MDA) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), indicando mitigação de danos às membranas celulares. Também foram observadas melhorias na integridade fisiológica e restauração de processos metabólicos afetados pelo estresse.

Além disso, sob estresse hídrico, as nanopartículas contribuíram para manutenção do conteúdo relativo de água e ativação do sistema antioxidante, sugerindo papel protetor contra desequilíbrios redox. Entretanto, alguns estudos mostraram aumento da peroxidação lipídica e intensificação do estresse oxidativo em concentrações elevadas, indicando que o efeito antioxidante é dependente da dose. Em condições de superexposição, foram relatados aumentos nos níveis de espécies reativas de oxigênio e redução da eficiência fotossintética.

Os efeitos das nanopartículas sobre a nutrição mineral da soja foram relatados em diversos estudos, apresentando alterações tanto na absorção quanto na redistribuição de macro e micronutrientes. Observou-se aumento na absorção de nutrientes como N, P, K e Zn em diferentes condições experimentais, além de modificações nos teores de Ca, Mg, S e ferro em órgãos vegetativos e reprodutivos.

Alguns estudos demonstraram biofortificação dos grãos, com incremento no teor de zinco e modulação do conteúdo de óleo e proteína, sugerindo potencial das nanopartículas para melhoria da qualidade nutricional da produção. Também foram relatadas alterações na composição mineral de vagens e tecidos comestíveis, indicando influência na dinâmica de translocação interna de nutrientes.

No que se refere à fixação biológica de nitrogênio, foram observados efeitos positivos em parte dos estudos, incluindo aumento da atividade nodular, melhoria da fixação biológica de nitrogênio e maior biomassa associada aos nódulos. Entretanto, também foram relatados casos de redução da fixação de nitrogênio e perturbação da microbiota associada às raízes e nódulos, especialmente em concentrações elevadas de nanopartículas ou em solos contaminados.

Alguns trabalhos indicaram alteração na diversidade bacteriana do rizosfera e interferência em vias metabólicas relacionadas ao estresse oxidativo, demonstrando que os efeitos das nanopartículas não se restringem à planta, mas também afetam o ambiente microbiano.

Em relação aos componentes de rendimento da soja foram relatados em parte dos estudos que conduziram experimentos até estágios reprodutivos ou ciclo completo. Entre os resultados positivos observados destacam-se aumento no número de vagens, incremento no peso de mil sementes, maior rendimento de grãos e melhoria na qualidade fisiológica das sementes.

Alguns estudos também relataram aumento do teor de óleo e proteína nos grãos, além de biofortificação com zinco, indicando potencial aplicação das nanopartículas na melhoria da qualidade nutricional da produção. Em condições de estresse hídrico ou toxicidade por metais, a aplicação de nanopartículas contribuiu para manutenção da produtividade, associada à melhoria da atividade antioxidante e maior eficiência fotossintética.

Foram observados efeitos negativos em determinadas situações, incluindo atraso no desenvolvimento fenológico, falha reprodutiva e redução do crescimento quando utilizadas concentrações elevadas. Em alguns casos, a exposição excessiva resultou em acúmulo de metais nos tecidos e prejuízo à fixação biológica de nitrogênio, impactando indiretamente o rendimento.

Parte dos estudos mostrou comportamento dependente da dose, com incremento produtivo em concentrações moderadas e redução do desempenho em níveis elevados, reforçando a importância da definição de faixas seguras de aplicação.

5.3 Efeitos das nanopartículas sob condições de estresse abiótico

5.3.1 Estresse por metais pesados (As, Cr e Cd)

A exposição da soja a metais pesados como arsênio (As), cromo (Cr) e cádmio (Cd) esteve entre as principais condições experimentais avaliadas nos estudos incluídos. De maneira

geral, as nanopartículas de ZnO e Fe₂O₃ demonstraram potencial modulador da toxicidade metálica, embora os efeitos tenham sido fortemente dependentes da concentração aplicada e do ambiente experimental.

Diversos estudos relataram diminuição do *uptake* de metais tóxicos nos tecidos vegetais após aplicação de nanopartículas, especialmente no caso de arsênio e cromo. Essa redução foi associada à possível competição iônica, imobilização parcial do metal no solo ou modulação de transportadores radiculares. Em condições de estresse por cádmio, também foram observadas reduções no acúmulo foliar do metal, sugerindo papel das nanopartículas na mitigação da translocação interna.

A toxicidade por metais pesados está intimamente relacionada à geração excessiva de espécies reativas de oxigênio. Nos estudos analisados, a aplicação de nanopartículas promoveu redução significativa de marcadores de dano oxidativo, como malondialdeído (MDA) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂). Paralelamente, observou-se aumento da atividade de enzimas antioxidantes, incluindo SOD, CAT, POD e APX.

Esses resultados indicam que as nanopartículas podem atuar como indutoras do sistema antioxidante, restaurando o equilíbrio redox celular sob condições de contaminação metálica.

Sob estresse por arsênio e cádmio, foram relatadas melhorias no teor de clorofila, na eficiência fotossintética e no crescimento vegetativo após tratamento com nanopartículas. Em alguns casos, houve reversão parcial da inibição do crescimento radicular e aumento da biomassa total.

Em concentrações elevadas de nanopartículas, observou-se intensificação do estresse oxidativo e redução do crescimento, indicando que o efeito mitigador possui faixa ótima de aplicação.

5.3.2 Estresse hídrico

Os efeitos das nanopartículas sob condições de estresse hídrico foram abordados em diversos estudos, tanto em ambientes controlados quanto em condições de campo. De modo geral, observou-se que a aplicação de nanopartículas esteve associada à melhoria da tolerância da soja ao déficit hídrico, com reflexos em parâmetros fisiológicos, bioquímicos e produtivos.

Um dos efeitos mais recorrentes foi o aumento do conteúdo relativo de água nas folhas, indicando melhor manutenção do estado hídrico das plantas sob escassez de água. Paralelamente, foram observadas melhorias na taxa fotossintética, na condutância estomática e na eficiência do uso da água, sugerindo maior capacidade de ajuste fisiológico em condições de estresse.

A ativação do sistema antioxidante também foi relatada como mecanismo central na mitigação dos efeitos da seca. O aumento da atividade de enzimas como superóxido dismutase, catalase e peroxidases esteve associado à redução de marcadores de estresse oxidativo, indicando que as nanopartículas contribuíram para a manutenção do equilíbrio redox celular sob déficit hídrico.

Em alguns estudos conduzidos até fases reprodutivas, verificou-se ainda melhoria nos componentes de rendimento sob estresse hídrico, com incremento no número de vagens e na biomassa total quando comparado ao controle estressado sem aplicação de nanopartículas. Esses resultados sugerem potencial aplicação das nanopartículas como ferramenta de mitigação em ambientes com irregularidade hídrica.

Assim como observado em outros tipos de estresse, os efeitos foram dependentes da concentração aplicada. Doses elevadas não resultaram em benefícios adicionais e, em alguns casos, comprometeram o crescimento vegetal, indicando que a resposta ao tratamento apresenta faixa ótima de aplicação.

Os estudos indicam que as nanopartículas podem contribuir para maior resiliência fisiológica da soja sob condições de déficit hídrico, embora a variabilidade metodológica e a predominância de experimentos em ambientes controlados limitem a extrapolação direta para condições de campo em larga escala.

5.3.3 Estresse biótico

Os efeitos sob condições de estresse biótico foram avaliados principalmente em estudos envolvendo patógenos fúngicos do gênero *Fusarium*, incluindo *Fusarium oxysporum* e *Fusarium virguliforme*, associado à Síndrome da Morte Súbita. De modo geral, os estudos indicaram que as nanopartículas podem atuar tanto como agentes com atividade antifúngica quanto como moduladoras de respostas fisiológicas da planta durante a infecção.

Em alguns experimentos, observou-se redução da severidade de doenças radiculares e supressão de sintomas relacionados à Síndrome da Morte Súbita, acompanhadas por aumento da biomassa radicular e recuperação de parâmetros fisiológicos prejudicados pela doença. Também foram relatados efeitos positivos sobre o balanço nutricional das plantas infectadas, com restauração de nutrientes que haviam sido alterados pela infecção.

A atividade antifúngica foi descrita como um dos mecanismos envolvidos, com relatos de inibição do crescimento do patógeno e consequente promoção do crescimento da planta infectada. Em paralelo, foi observada maior ativação do sistema antioxidante e manutenção de pigmentos fotossintéticos em plantas sob estresse biótico tratadas com nanopartículas,

sugerindo efeito indireto pela mitigação do estresse oxidativo gerado durante a interação planta patógeno.

Há uma limitação quanto aos estudos sob estresse abiótico, tanto em número de publicações quanto em diversidade de patógenos avaliados. Além disso, há variação considerável nas condições experimentais, na forma de inoculação e nas doses aplicadas, o que dificulta a comparação direta entre resultados.

5.3.4 Alterações na microbiota do solo e efeitos ecológicos

Além dos efeitos diretos sobre a planta, alguns estudos incluídos avaliaram o impacto das nanopartículas sobre a microbiota do solo e sobre processos biológicos associados à rizosfera. Os resultados indicaram que as nanopartículas podem interferir na diversidade bacteriana, na atividade microbiana e na fixação biológica de nitrogênio, especialmente quando aplicadas em concentrações elevadas.

Foram observadas alterações na estrutura da comunidade microbiana associada às raízes e nódulos, com perturbação de vias metabólicas relacionadas ao estresse oxidativo. Em alguns casos, verificou-se redução da eficiência da fixação biológica de nitrogênio e diminuição da atividade nodular, sugerindo possível impacto negativo sobre a simbiose entre soja e rizóbios.

Também foram relatados efeitos de toxicidade microbiana no solo em altas concentrações de nanopartículas, com consequente redução do crescimento vegetal. Esses achados indicam que, embora as nanopartículas possam promover benefícios fisiológicos à planta em determinadas condições, sua interação com o ecossistema edáfico deve ser considerada com cautela.

Não foram observados por alguns autores efeitos negativos significativos sobre a microbiota quando utilizadas concentrações moderadas, indicando que o impacto ambiental depende da dose, do tipo de nanopartícula e das características do solo.

6 DISCUSSÃO

6.1 Tendência geral das respostas fisiológicas à aplicação de nanopartículas

A análise dos 30 estudos selecionados apresentou que a aplicação de nanopartículas metálicas na cultura da soja desencadeia respostas fisiológicas predominantemente positivas quando utilizadas em concentrações baixas a moderadas, com destaque para as nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs), que representaram a maior parte das investigações incluídas.

Diversos estudos relataram incremento na biomassa, na atividade fotossintética e no rendimento de sementes após aplicação de ZnO-NPs. Tanha et al. (2020) observaram aumento significativo do rendimento até a dose de 160 mg Zn/kg, estabelecendo esse nível como seguro antes da ocorrência de fitotoxicidade. Em estudo posterior, Tanha et al. (2023) verificaram aumento de 63,2% no rendimento de proteína e 39,8% no teor de óleo com aplicação de 200 mg/kg, evidenciando potencial de biofortificação. Resultados semelhantes foram reportados por Ernst et al. (2024), que observaram incremento no número de vagens e produtividade superior a 4 t/ha com aplicação foliar, além de aumento na densidade de sementes.

Sob condições de estresse hídrico, Naghani et al. (2024) demonstraram aumento de 33% na clorofila-a e incremento de até 79% no rendimento em comparação ao controle, associado à ativação do sistema antioxidante. De maneira semelhante, Basit et al. (2023) relataram mitigação da toxicidade por cromo, com aumento da taxa fotossintética e biomassa, enquanto Gam et al. (2025) observaram restauração da atividade fotossintética e redução de danos oxidativos sob estresse por cádmio.

Entretanto, o padrão observado não é linear. A ocorrência de efeitos adversos em concentrações elevadas foi recorrente. Yoon et al. (2014) verificaram que a dose de 500 mg/kg de ZnO-NPs impediu a formação de sementes e reduziu drasticamente o comprimento radicular. Hashemi et al. (2019) também relataram redução de pigmentos fotossintéticos e aumento de peroxidação lipídica, indicando estresse oxidativo induzido por excesso de nanopartículas. Tanha et al. (2020) confirmaram comportamento dose-dependente, com fitotoxicidade evidente em doses acima de 160 mg/kg.

No caso das nanopartículas de óxido de ferro (Fe_2O_3 -NPs), os efeitos positivos estiveram frequentemente associados à nutrição e à fixação biológica de nitrogênio. Cao et al. (2022) observaram aumento de 55,4% na biomassa aérea e 99% na biomassa nodular, além de incremento de 13,7% na produtividade. De forma semelhante, Zhang et al. (2025) demonstraram que o nanocompósito $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ aumentou significativamente o número e peso de nódulos, bem como a taxa fotossintética, sugerindo interação positiva com o metabolismo nitrogenado.

Efeitos negativos também foram registrados para Fe_2O_3 -NPs em altas concentrações. Zhang e Liu (2024) relataram toxicidade microbiana no solo e redução do crescimento vegetal, indicando que o padrão dose-dependente também se aplica ao ferro nanoestruturado.

Os estudos analisados convergem para um comportamento hormético, caracterizado por estímulo fisiológico em doses baixas e inibição em concentrações elevadas. Esse padrão foi

evidente tanto para ZnO-NPs quanto para Fe₂O₃-NPs, embora os efeitos agrônômicos positivos tenham sido mais frequentemente associados ao zinco.

Os estudos analisados indicam que a distinção entre efeito nutricional e efeito indutor de estresse baseia-se predominantemente em parâmetros fisiológicos e bioquímicos. Incrementos em biomassa, atividade fotossintética e modulação antioxidante associada à redução de MDA e espécies reativas de oxigênio caracterizam resposta adaptativa. Em contraste, aumento persistente de peroxidação lipídica, redução de pigmentos e comprometimento funcional indicam transição para estresse. Assim, a literatura diferencia benefício e fitotoxicidade não apenas pelo crescimento aparente, mas pelo estado redox e desempenho metabólico da planta.

6.2 Modulação do sistema antioxidante e equilíbrio redox

A ativação do sistema antioxidante constituiu o mecanismo fisiológico mais recorrente nos estudos analisados, independentemente do tipo de nanopartícula empregada. A maioria dos trabalhos que relataram incremento no crescimento ou mitigação de estresses ambientais associou esses efeitos à regulação do balanço redox celular.

No caso das ZnO-NPs, a redução de marcadores de estresse oxidativo como malondialdeído (MDA) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) foi consistentemente observada em condições de estresse por metais pesados. Basit et al. (2023) demonstraram que a aplicação foliar de ZnO-NPs reduziu significativamente MDA e H₂O₂ sob toxicidade por cromo, concomitantemente ao aumento da atividade de SOD, POD e CAT. De forma semelhante, Bhat et al. (2022b) verificaram redução de 71% em MDA e 82% em H₂O₂ sob estresse por arsênio quando ZnO-NPs foram aplicadas em associação com melatonina, indicando sinergismo na ativação antioxidante.

Resultados comparáveis foram reportados por Zeeshan et al. (2021), que observaram restauração do Fv/Fm, aumento de prolina, glutathiona reduzida (GSH) e ácido ascórbico (ASA), além de redução expressiva de espécies reativas de oxigênio sob estresse por arsênio. Esses dados sugerem que as nanopartículas atuam promovendo ajustes metabólicos que preservam a integridade de membranas e do aparato fotossintético.

Sob estresse hídrico, Naghani et al. (2024) relataram aumento da atividade de SOD, CAT e POD associado à elevação da clorofila e incremento de rendimento. Linh et al. (2020) também observaram aumento do Índice de Tolerância à Seca (DTI) e upregulação de genes relacionados à resposta ao estresse, como GmERD1 e GmWRKY27, indicando que a modulação antioxidante pode estar integrada a mecanismos de regulação gênica.

Para as Fe₂O₃-NPs, o padrão foi semelhante. Cao et al. (2022) observaram aumento da atividade antioxidante nos nódulos radiculares, associado à maior biomassa nodular e produtividade. Zhang et al. (2025) também relataram redução de MDA e aumento de SOD e POD após aplicação de nanocompósito Fe₂O₃/g-C₃N₄, evidenciando papel direto no controle do estresse oxidativo.

Quando aplicadas em concentrações elevadas, as nanopartículas podem provocar efeito oposto. Hashemi et al. (2019) verificaram aumento de MDA e redução de clorofila após aplicação de ZnO-NPs sintetizadas via extrato de oliva, indicando sobrecarga oxidativa. Yoon et al. (2014) também reportaram efeitos negativos severos em microcosmos, com prejuízo ao desenvolvimento reprodutivo. Esses resultados reforçam que o sistema antioxidante atua como limite fisiológico da tolerância à nanopartícula.

Observa-se que a transição entre efeitos benéficos e adversos é fortemente condicionada à dose aplicada, à via de aplicação e às propriedades físico-químicas das nanopartículas. A maioria dos estudos demonstra padrão dose-dependente, no qual concentrações baixas ou moderadas promovem estímulo fisiológico, enquanto doses elevadas desencadeiam estresse oxidativo e prejuízos ao crescimento e à reprodução. Dessa forma, a literatura aponta que o limiar entre nutrição e toxicidade é determinado por fatores experimentais específicos, especialmente concentração, tamanho de partícula e método de síntese.

Os dados indicam que as nanopartículas podem atuar como moduladoras do status redox celular, promovendo respostas adaptativas quando aplicadas em concentrações adequadas. Agronomicamente, essa modulação traduz-se em maior estabilidade fotossintética sob estresse, manutenção da integridade de membranas e, conseqüentemente, incremento de produtividade. A linha entre bioestimulação e fitotoxicidade é estreita e fortemente dependente da dose, da forma de síntese e das condições ambientais.

6.3 Fotossíntese, eficiência do aparato fotossintético e implicações produtivas

A melhoria dos parâmetros fotossintéticos foi um dos efeitos fisiológicos mais frequentemente associados à aplicação de nanopartículas na soja. Em diversos estudos, o incremento na taxa fotossintética líquida, na condutância estomática e no teor de clorofila esteve diretamente relacionado ao aumento da biomassa e do rendimento.

Alidoust e Isoda (2013) observaram que a pulverização foliar de nanopartículas de óxido de ferro revestidas com ácido cítrico aumentou a taxa fotossintética em 32%, acompanhada de maior alongamento radicular. Esse resultado evidencia que o ferro nanoestruturado pode

melhorar a eficiência fotossintética por meio da otimização da nutrição férrica, elemento essencial na cadeia transportadora de elétrons.

No caso das ZnO-NPs, incrementos na atividade fotossintética foram amplamente relatados. Basit et al. (2023) registraram aumento na taxa fotossintética e na biomassa sob estresse por cromo. Bhat et al. (2022b) verificaram recuperação da fotossíntese sob toxicidade por arsênio, enquanto Zeeshan et al. (2021) observaram restauração do Fv/Fm e do índice SPAD, indicando manutenção da eficiência do fotossistema II.

Sob estresse hídrico, Naghani et al. (2024) relataram aumento de 33% na clorofila-a e incremento significativo no rendimento, associado à ativação antioxidante. De maneira semelhante, Yadav et al. (2024) observaram aumento da taxa fotossintética entre 33,9% e 86,2% com aplicação de ZnO e Fe₂O₃-NPs, acompanhado de maior produtividade e redução do ácido fítico.

Esses resultados sugerem que a manutenção da integridade do aparato fotossintético constitui um dos principais mecanismos pelos quais as nanopartículas promovem ganhos agrônômicos. A redução do estresse oxidativo contribui para preservar a estrutura dos tilacoides e a funcionalidade dos fotossistemas, resultando em maior assimilação de carbono e, conseqüentemente, maior acúmulo de biomassa.

Hashemi et al. (2019) relataram redução significativa de clorofila e aumento de peroxidação lipídica em altas concentrações de ZnO-NPs. Yoon et al. (2014) observaram prejuízo ao desenvolvimento fenológico e falha reprodutiva em microcosmos tratados com 500 mg/kg de ZnO-NPs, indicando que o excesso compromete não apenas a fotossíntese, mas todo o desenvolvimento da planta.

Moreno (2010) demonstrou que altas concentrações de ZnO reduziram o crescimento radicular e alteraram o perfil genético, enquanto CeO₂ apresentou maior impacto na estabilidade genética, reforçando que diferentes metais nanoestruturados exercem efeitos distintos sobre o metabolismo fotossintético e a estabilidade celular.

Os dados indicam que as nanopartículas atuam preservando a eficiência do fotossistema II e mantendo a homeostase redox, fatores essenciais para a assimilação de carbono sob condições adversas. Esse mecanismo produz maior produtividade e estabilidade do rendimento, especialmente em ambientes com estresse abiótico. Entretanto, a ausência de padronização nas doses e nas condições experimentais ainda impede extrapolações diretas para recomendações em campo.

6.4 Sistema radicular, arquitetura de raízes e absorção de nutrientes

A resposta do sistema radicular à aplicação de nanopartículas foi um dos componentes mais frequentemente associados aos ganhos fisiológicos observados na soja, sobretudo quando as nanopartículas foram aplicadas em concentrações moderadas e em fases iniciais do desenvolvimento. O aumento do alongamento radicular, o aprimoramento da arquitetura do sistema radicular e a maior biomassa de raízes sugerem que parte dos efeitos produtivos relatados pode estar relacionada ao aumento da capacidade de exploração do solo e, conseqüentemente, à maior absorção de água e nutrientes.

Alidoust e Isoda (2013) observaram aumento de até 40% no alongamento radicular após aplicação de nanopartículas de óxido de ferro, com desempenho superior quando as partículas foram revestidas com citrato e aplicadas via foliar. Esse resultado é particularmente relevante para a Agronomia, pois indica que o benefício não depende apenas da presença do nutriente, mas também da formulação e da via de aplicação, fatores que influenciam a eficiência do fornecimento de ferro e sua participação em processos metabólicos essenciais.

Tanha et al. (2022) demonstraram melhoria expressiva da arquitetura do sistema radicular e aumento de 48% no peso seco de raízes com nanopartículas de menor tamanho, associando esse efeito à maior disponibilidade e bioacumulação de zinco em raízes e sementes. A influência do tamanho da nanopartícula, destacada por Tanha et al. (2022), sugere que propriedades físico-químicas específicas podem determinar não apenas a absorção, mas também a distribuição interna e a eficiência agronômica do tratamento.

Montanha et al. (2020) relataram aumento de aproximadamente 40% na germinação com revestimento de sementes com ZnO, acompanhado de maior desenvolvimento radicular e da parte aérea, indicando que essa via pode ser promissora para suprimento inicial de micronutrientes. Jia et al. (2025) também observaram que o priming de sementes com nanopartículas melhorou germinação e biomassa, além de reduzir a toxicidade de cádmio, reforçando a relevância do tratamento de sementes como estratégia agronômica.

Haghaninia et al. (2025) observaram aumento na absorção de N, P, K e Zn e incremento de rendimento e teor de óleo sob estresse hídrico, sugerindo que a resposta radicular e a eficiência nutricional caminham em conjunto. Em paralelo, Yang et al. (2020) demonstraram que nanopartículas de Fe_2O_3 revestidas com ácido fúlvico estimularam a formação de nódulos radiculares e aumentaram a absorção de Fe, K e Zn, reforçando que agentes de revestimento podem potencializar a resposta fisiológica e reduzir limitações associadas à disponibilidade do micronutriente no solo.

Em concentrações elevadas, os estudos reportaram inibição do crescimento radicular e prejuízos fenológicos. Yoon et al. (2014) observou redução de 89% no comprimento radicular e falha reprodutiva em microcosmos tratados com 500 mg/kg de ZnO-NPs. Moreno (2010) também relatou redução do crescimento radicular e lignificação sob altas concentrações de ZnO, evidenciando que o sistema radicular é um dos primeiros compartimentos a manifestar fitotoxicidade.

Além dos efeitos diretos sobre a planta, alterações no solo e na microbiota também podem interferir na resposta radicular. Chen et al. (2023) demonstraram que doses elevadas de zinco nanoparticulado reduziram a diversidade bacteriana em raízes e nódulos, com perturbação metabólica relacionada aos ciclos de carbono e nitrogênio, o que pode impactar a nutrição e o crescimento radicular de forma indireta.

6.5 Interação com nodulação, fixação biológica de nitrogênio e microbiota associada

A fixação biológica de nitrogênio é um processo central para a produtividade da soja e depende de uma interação fisiologicamente sensível entre planta, rizóbios e ambiente edáfico. Nos estudos incluídos, observou-se que nanopartículas metálicas podem tanto favorecer quanto comprometer esse processo, dependendo do tipo de nanopartícula, da dose, da forma de aplicação e dos efeitos indiretos sobre a microbiota do solo.

Evidências de efeitos positivos sobre nodulação e fixação foram particularmente associadas às nanopartículas de ferro. Cao et al. (2022) demonstraram que nanomateriais de γ - Fe_2O_3 aumentaram em 99% a biomassa dos nódulos e em 55,4% a biomassa aérea, com incremento de 13,7% na produtividade em comparação ao fertilizante convencional com EDTA-Fe. Esse resultado sugere que a forma nanoestruturada do ferro pode melhorar a nutrição férrica em compartimentos-chave da simbiose, favorecendo o metabolismo energético necessário para manutenção de nódulos ativos.

Corroborando essa tendência, Yang et al. (2020) observaram que nanopartículas $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ revestidas com ácido fúlvico estimularam a formação de nódulos e aumentaram a absorção de Fe, K e Zn. O uso de revestimentos naturais sugere estratégia relevante do ponto de vista agrônomo, pois pode aumentar a compatibilidade das nanopartículas com o ambiente do solo e reduzir riscos de imobilização ou efeitos tóxicos associados à aplicação direta.

Além disso, Zhang et al. (2025) demonstraram que o nanocompósito $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$ aumentou número e peso de nódulos, elevou a clorofila e a taxa fotossintética e reduziu MDA, indicando simultaneamente promoção do metabolismo nitrogenado e mitigação do estresse oxidativo. Esses achados reforçam que o desempenho da fixação biológica de nitrogênio

depende fortemente da manutenção do equilíbrio redox e do fornecimento de ferro, elemento crucial para enzimas envolvidas no metabolismo energético e na funcionalidade nodular.

Por outro lado, alguns estudos evidenciaram que nanopartículas podem comprometer a simbiose, especialmente quando aplicadas em altas doses ou quando alteram a microbiota associada. Chen et al. (2023) relataram que doses elevadas de ZnO (500 mg/kg) reduziram significativamente a diversidade bacteriana em raízes e nódulos, além de alterar metabólitos relacionados aos ciclos de carbono e nitrogênio. Esse padrão sugere que, mesmo quando a planta não apresenta sintomas imediatos severos, podem ocorrer alterações funcionais na rizosfera capazes de afetar o desempenho de longo prazo.

A literatura incluída também aponta que diferentes metais nanoestruturados possuem perfis distintos de impacto sobre a fixação de nitrogênio. Priester et al. (2012) observaram que CeO₂ inibiu a nitrogenase em mais de 80% e reduziu biomassa de vagens, enquanto ZnO foi translocado para sementes, levantando implicações tanto para fertilidade do solo quanto para bioacumulação. Em estudo posterior, Priester et al. (2017) reforçaram que CeO₂ reduz o potencial de fixação de N₂ nos nódulos, enquanto o rendimento se mostrou relativamente resiliente ao ZnO apesar da redução de clorofila em doses elevadas. Esses resultados indicam que nanopartículas podem afetar o sistema nodular por vias distintas, incluindo toxicidade direta, interferência microbiana e perturbações do metabolismo oxidativo.

Do ponto de vista agrônômico, esses achados têm implicações diretas. A soja é altamente dependente da fixação biológica de nitrogênio para expressar seu potencial produtivo, e qualquer tecnologia que altere negativamente a microbiota ou a nodulação pode comprometer ganhos de produtividade mesmo que promova aumento temporário de biomassa ou clorofila. Assim, a aplicação de nanopartículas deve considerar não apenas respostas imediatas da planta, mas também efeitos sobre a simbiose e a estabilidade biológica do solo.

Os estudos analisados indicam que nanopartículas de ferro, especialmente quando revestidas ou formuladas em nanocompósitos, tendem a favorecer nodulação e fixação biológica de nitrogênio, enquanto nanopartículas de zinco em doses elevadas podem alterar microbiota e comprometer processos simbióticos. Ainda assim, a variabilidade de doses e condições experimentais reforça a necessidade de mais estudos integrados, especialmente em campo e em ciclos completos, para estabelecer segurança e eficiência agrônômica.

6.6 Biofortificação, qualidade nutricional e riscos de bioacumulação

Além dos efeitos sobre crescimento e produtividade, os estudos incluídos nesta revisão indicaram que a aplicação de nanopartículas pode alterar significativamente a composição nutricional dos grãos de soja, com implicações tanto agronômicas quanto alimentares.

Tanha et al. (2023) relataram aumento de 63,2% no rendimento de proteína e 39,8% no teor de óleo com aplicação de 200 mg/kg de ZnO-NPs de 38 nm, além de maior acúmulo de P e K nas sementes. De forma complementar, Tanha et al. (2022) observaram maior bioacumulação de zinco em raízes e sementes, associada à melhoria da arquitetura radicular. Esses resultados indicam que o zinco nanoestruturado pode não apenas suprir deficiência nutricional da planta, mas também enriquecer o valor nutricional do grão.

Resultados semelhantes foram observados por Ernst et al. (2024), que relataram incremento no número de vagens e produtividade superior a 4 t/ha, com melhoria de índices fisiológicos e biofortificação quando ZnO-NPs foram aplicadas via foliar. Haghaninia et al. (2025) também observaram aumento de 24,32% no teor de óleo e melhoria na composição de ácidos graxos insaturados sob estresse hídrico, sugerindo que o efeito nutricional pode estar associado à modulação metabólica induzida pelo tratamento.

Yadav et al. (2024) relataram aumento de 4,6–18,3% no rendimento de sementes e redução do ácido fítico com aplicação de ZnO e Fe₂O₃-NPs. A redução do ácido fítico é particularmente relevante do ponto de vista nutricional, pois esse composto atua como fator antinutricional, diminuindo a biodisponibilidade de minerais.

Os estudos também apontam potenciais riscos de bioacumulação e alterações no valor nutricional. Videia (2014) demonstrou que tanto CeO₂ quanto ZnO alteraram o conteúdo de macronutrientes e micronutrientes em vagens, com redução de Ca e aumento de P e Cu no caso de CeO₂, além de aumento de Zn e alteração de Fe nas folhas no caso de ZnO. Esses achados indicam que a aplicação de nanopartículas pode modificar a composição mineral da planta de maneira complexa.

Priester et al. (2012) observaram translocação de ZnO para as sementes, levantando questionamentos sobre possíveis impactos na cadeia alimentar. No mesmo estudo, CeO₂ comprometeu severamente a fixação de nitrogênio e reduziu biomassa de vagens, evidenciando que diferentes nanopartículas apresentam perfis de risco distintos.

Moreno (2010) também relatou acúmulo significativo de Zn e Ce nos tecidos vegetais, além de alterações genéticas detectadas por RAPD, indicando potencial impacto na estabilidade genética sob altas concentrações.

Sob perspectiva ecofisiológica, a bioacumulação pode estar associada à maior mobilidade e translocação das nanopartículas ou de seus íons dissolvidos, especialmente no caso do ZnO, cuja solubilidade parcial pode facilitar absorção e redistribuição. Do ponto de vista agrônomo, a biofortificação representa oportunidade relevante para melhoria nutricional dos grãos, mas exige avaliação rigorosa de limites seguros para evitar riscos de acúmulo excessivo e potenciais impactos à saúde humana e animal.

Observou-se durante esta revisão que os ZnO-NPs apresentam potencial significativo para biofortificação e melhoria da qualidade dos grãos, enquanto nanopartículas como CeO₂ demonstram maior risco de interferência negativa na fisiologia e na fertilidade do sistema. A consolidação do uso agrônomo dessas tecnologias requer avaliação integrada de produtividade, qualidade nutricional e segurança alimentar.

A partir da síntese dos estudos, é possível propor três critérios integrados para organizar a descrição da dupla funcionalidade das nanopartículas na literatura científica:

- (i) critério redox, baseado no equilíbrio entre ativação antioxidante e dano oxidativo;
- (ii) critério funcional, fundamentado no desempenho fotossintético, nutricional e produtivo;
- (iii) critério simbiótico e reprodutivo, considerando a estabilidade da fixação biológica de nitrogênio e a formação de sementes.

A aplicação conjunta desses critérios permite diferenciar de forma mais objetiva respostas adaptativas de respostas fitotóxicas, contribuindo para interpretação mais consistente dos resultados experimentais.

6.7 Limitações metodológicas da literatura e implicações para aplicação em campo

Apesar do volume crescente de estudos sobre nanopartículas aplicadas à cultura da soja, a literatura analisada apresentou limitações metodológicas importantes que restringem a extrapolação dos resultados para recomendações agrônomicas consolidadas, especialmente em condições de campo.

A primeira limitação relevante refere-se à alta heterogeneidade das doses empregadas e à ausência de padronização entre experimentos. Enquanto alguns trabalhos identificaram faixas seguras e eficientes, outros utilizaram concentrações extremamente elevadas, associadas a efeitos fitotóxicos severos. Tanha et al. (2020) estabeleceram um nível seguro de 160 mg Zn/kg para ZnO-NPs em solo, acima do qual ocorreu fitotoxicidade, e Yoon et al. (2014) demonstraram falha reprodutiva com 500 mg/kg. Esses contrastes indicam que a escolha de

dose é determinante para o desfecho e que a comparação direta entre estudos se torna limitada quando não há convergência de faixas experimentais.

Outra limitação relevante é a predominância de estudos conduzidos em condições controladas, como vasos, casa de vegetação, câmaras de crescimento e microcosmos, com menor proporção de ensaios em campo. Embora existam estudos em condições mais próximas da prática agrícola, como os relatados por Ernst et al. (2024, 2024b), a maioria dos trabalhos ainda avalia respostas fisiológicas em curto prazo e em ambientes com controle de variáveis, o que tende a amplificar efeitos benéficos e reduzir a complexidade de interações solo, clima e microbiota.

A literatura incluiu tanto nanopartículas comerciais quanto sintetizadas em laboratório, além de diferentes rotas de síntese, revestimentos e morfologias. Essa diversidade pode alterar solubilidade, reatividade superficial e disponibilidade iônica, impactando diretamente a resposta da planta. Estudos com revestimentos naturais, como o uso de ácido fúlvico em $n\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Yang et al., 2020) ou ácido cítrico associado a Fe_2O_3 (Bhat et al., 2022a; Alidoust e Isoda, 2013), sugerem que formulação e superfície das nanopartículas podem ser tão importantes quanto o tipo de metal em si.

Além disso, a evidência sobre efeitos ecológicos e microbiológicos ainda é fragmentada e, em alguns casos, aponta riscos potenciais. Chen et al. (2023) demonstraram redução da diversidade bacteriana em raízes e nódulos sob doses elevadas de ZnO , enquanto Zhang e Liu (2024) relataram toxicidade microbiana e redução do crescimento vegetal com excesso de Fe_2O_3 . Priester et al. (2012; 2017) também destacaram efeitos severos de CeO_2 sobre nodulação e atividade nitrogenásica. Esses achados indicam que avaliações exclusivamente baseadas em biomassa ou clorofila podem ser insuficientes para garantir sustentabilidade do uso.

Outro ponto crítico é que parte dos estudos não acompanhou o ciclo completo da cultura, ou avaliou parâmetros reprodutivos de forma limitada. Isso é relevante porque efeitos positivos na fase vegetativa podem não se traduzir em ganho produtivo, e efeitos negativos em doses elevadas podem se manifestar tardiamente, como sugerido por Yoon et al. (2014) ao demonstrar comprometimento da reprodução.

6.8 Síntese integrativa e perspectivas para pesquisas futuras

A análise integrada dos estudos incluídos nesta revisão de escopo demonstra que nanopartículas metálicas, especialmente ZnO -NPs e Fe_2O_3 -NPs, apresentam potencial significativo para modulação ecofisiológica da soja, com reflexos sobre crescimento, metabolismo antioxidante, eficiência fotossintética, nutrição mineral e rendimento.

De forma geral, os dados convergem para um padrão hormético de resposta, no qual concentrações baixas a moderadas promovem estímulo fisiológico, enquanto doses elevadas resultam em estresse oxidativo, prejuízo ao crescimento radicular e, em alguns casos, comprometimento reprodutivo. Esse comportamento foi evidenciado tanto para ZnO-NPs quanto para Fe₂O₃-NPs, embora o zinco tenha apresentado maior associação com incremento produtivo e biofortificação, e o ferro com melhoria da nodulação e da fixação biológica de nitrogênio.

Os principais mecanismos envolvidos incluem a modulação do sistema antioxidante, a manutenção da integridade do aparato fotossintético e o aprimoramento da arquitetura radicular. Esses processos estão intimamente conectados e explicam a maior tolerância a estresses abióticos, como toxicidade por metais pesados e déficit hídrico, relatada por diversos autores. A ativação de enzimas antioxidantes, a redução de MDA e H₂O₂ e a preservação do fotossistema II constituem eixos centrais dessa resposta adaptativa.

Entretanto, os efeitos sobre microbiota do solo e fixação biológica de nitrogênio indicam que o uso indiscriminado pode comprometer a sustentabilidade do sistema produtivo. Alterações na diversidade bacteriana e impactos sobre a atividade nodular reforçam que a avaliação agrônoma deve ir além do crescimento vegetativo, integrando indicadores ecológicos e de longo prazo.

Do ponto de vista aplicado, os resultados sugerem que as nanopartículas podem atuar como nanofertilizantes ou bioestimulantes em condições específicas, particularmente em solos deficientes ou sob estresse ambiental. Contudo, a ausência de padronização de doses, a predominância de experimentos em ambiente controlado e a limitada quantidade de estudos de campo impedem a formulação de recomendações técnicas definitivas.

Assim, futuras pesquisas devem priorizar:

- Ensaios em campo sob diferentes condições edafoclimáticas
- Avaliação em ciclo completo da cultura
- Definição de faixas seguras e eficientes de aplicação
- Estudos de longo prazo sobre impactos na microbiota e no solo
- Padronização de métodos de síntese e caracterização das nanopartículas

A consolidação do uso agrônomo de nanopartículas na cultura da soja depende de abordagem integrada que combine fisiologia, microbiologia do solo e produtividade, garantindo eficiência sem comprometer a sustentabilidade do sistema agrícola.

Com o propósito de integrar de maneira sistemática os achados deste estudo elaborou-se uma matriz síntese que organiza os estudos incluídos segundo tipo de nanopartícula, tamanho, dose, via de aplicação e foco experimental, associando essas variáveis à natureza predominante da resposta fisiológica observada (Tabela 8). A classificação adotada contempla cinco categorias interpretativas: benéfico, quando os efeitos foram majoritariamente positivos nas doses avaliadas; tóxico, quando predominaram respostas adversas; hormético, quando foi demonstrada resposta dose-dependente com estimulação em baixas ou médias doses e toxicidade em concentrações elevadas; misto, quando ocorreram efeitos simultaneamente benéficos e prejudiciais ou respostas inconsistentes; e descritivo, quando o estudo se limitou à caracterização do fenômeno sem posicionamento funcional claro.

Tabela 8. Matriz conceitual: classificação da dualidade funcional (≤ 100 nm)

Autor/Ano	NP	Tamanho (nm)	Dose	Via	Parâmetro Determinante	Classificação
Alidoust & Isoda 2013	Fe ₂ O ₃	6	50–2000 mg/L	Foliar/Solo	↑ fotossíntese, ↑ crescimento radicular	 BENÉFICO
Basit et al. 2023	ZnO	15–30	0–100 mg/L	Foliar	↑ biomassa, ↑ SOD/POD/CAT, ↓ MDA/H ₂ O ₂ sob Cr	 BENÉFICO
Bhat et al. 2022a	Fe ₂ O ₃	~47	1000 mg/L	Foliar	↑ biomassa, ↑ enzimas antioxidantes sob As	 BENÉFICO
Bhat et al. 2022b	ZnO	46	150 mg/L	Foliar	↓ estresse oxidativo, ↑ enzimas sob As	 BENÉFICO
Chen et al. 2023	ZnO	25	500 mg/kg	Solo	↓ diversidade bacteriana, ± metabólitos	 MISTO
Ernst et al. 2024	ZnO	<100	10 mg/L	Foliar	↑ produtividade, ↑ densidade sementes	 BENÉFICO
Ernst et al. 2024b	ZnO	<100	1,4–140 mg/L	Foliar	↑ rendimento, ↑ viabilidade polínica	 BENÉFICO
Gam et al. 2025	ZnO	27–48	1000 mg/L	Foliar/Solo	↑ fotossíntese, ↓ toxicidade por Cd	 BENÉFICO
Gomes 2021	ZnO	60	2300 mg/L	Foliar	↑ absorção Zn, sem fitotoxicidade	 DESCRITIVO
Guo et al. 2025	Fe ₂ O ₃	20	10–500 mg/L	Foliar	↑ defesa contra Fusarium, ↑ SOD, ↓ doença	 BENÉFICO
Hashemi et al. 2019	ZnO	~41	200–400 ppm	Solução	↓ clorofila, ↑ peroxidação lipídica	 TÓXICO

Hossain et al. 2016	ZnO	15–60	500 ppm	Solução	Fitotoxicidade severa, ↑ estresse oxidativo	 TÓXICO
Jia et al. 2025	ZnO	5–30	50–500 mg/L	Seed priming	↑ germinação, ↑ fotossíntese, ↓ toxicidade Cd	 BENÉFICO
Montanha et al. 2020	ZnO	40	4 mg/kg semente	Seed priming	↑ germinação, ↑ desenvolvimento radicular	 BENÉFICO
Moreno et al. 2010	ZnO	8	500–4000 mg/L	Solução	↓ crescimento radicular, genotoxicidade	 TÓXICO
Naghani et al. 2024	ZnO	20	50–200 mg/L	Foliar	↑ clorofila, ↑ rendimento, ↑ SOD/CAT/POD	 BENÉFICO
Perez et al. 2019	ZnO	10–100	500–1000 µg/mL	Foliar	↓ doença (SDS), ↑ nutrientes	 BENÉFICO
Priester et al. 2012	ZnO	8–10	50–500 mg/kg	Solo	Bioacumulação Zn, ↓ fixação de N	 MISTO
Priester et al. 2017	ZnO	8–10	50–500 mg/kg	Solo	↓ clorofila, genotoxicidade	 MISTO
Tanha et al. 2020	ZnO	38	0–400 mg/kg	Solo	↑ crescimento, ↑ antioxidantes (160 mg/kg); ↓ crescimento, ↑ MDA (400 mg/kg)	 HORMÉTICO
Tanha et al. 2022	ZnO	38	0–500 mg/kg	Solo	↑ biomassa radicular, bioacumulação Zn	 BENÉFICO
Tanha et al. 2023	ZnO	38	0–500 mg/kg	Solo	↑ proteína, ↑ óleo, ↑ nutrientes grãos	 BENÉFICO
Videa et al. 2014	ZnO	10	50–500 mg/kg	Solo	↓ Fe, ↑ Zn; ± Ca, P, Cu	 MISTO
Yadav et al. 2024	ZnO/Fe ₂ O ₃	13/15	25 mg/kg	Solo	↑ fotossíntese, ↑ rendimento, ↓ ácido fítico	 BENÉFICO
Yang et al. 2020	Fe ₂ O ₃	5	15–60 mg/vaso	Foliar/Solo	↑ nódulos, ↑ absorção nutrientes	 BENÉFICO
Yoon et al. 2014	ZnO	<50	500 mg/kg	Solo	Falha reprodutiva, ↓ crescimento radicular	 TÓXICO
Zeeshan et al. 2021	ZnO	20	25 µM	Solução	↑ Fv/Fm, ↑ prolina/GSH/ASA, ↓ estresse As	 BENÉFICO
Zhang & Liu 2024	Fe ₂ O ₃	20	0,4–1,2%	Solo	↓ diversidade microbiana, ↓ crescimento	 TÓXICO
Zhang et al. 2025	Fe ₂ O ₃ /g-C ₃ N ₄	30	10–200 mg/kg	Solo	↑ nódulos, ↑ fotossíntese, ↓ MDA	 BENÉFICO

Nota: O estudo de Tanha et al. (2020) testou as doses 0, 40, 80, 160 e 400 mg/kg, apresentando resposta hormética clara: efeitos benéficos até 160 mg/kg e efeitos tóxicos em 400 mg/kg.

Essa organização matricial permite visualizar padrões de transição entre nutrição e estresse, evidenciando o papel central da dose, da via de aplicação e das propriedades físico-químicas das nanopartículas na determinação da resposta vegetal. Ao consolidar essas evidências em um modelo classificatório comparativo, a matriz contribui para reduzir ambiguidades interpretativas na literatura, oferecendo uma estrutura analítica que pode subsidiar tanto futuras investigações experimentais quanto decisões agronômicas relacionadas ao uso seguro e eficiente de nanopartículas na cultura da soja.

7 CONCLUSÃO

Esta revisão de escopo atingiu o objetivo proposto ao mapear e sistematizar as evidências sobre o uso de nanopartículas de ZnO e Fe₂O₃ na soja, analisando sua dualidade funcional sob as perspectivas fisiológica e agronômica.

Em resposta à primeira pergunta norteadora, os estudos caracterizam a função nutricional por incrementos em biomassa, produtividade, teor de clorofila e acúmulo de nutrientes nos grãos, com destaque para biofortificação com Zn. A função indutora de estresse é identificada por marcadores de estresse oxidativo, como MDA e H₂O₂, e pela modulação da atividade de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, POD), cuja ativação pode representar tanto resposta adaptativa quanto sinal de desequilíbrio redox, a depender da dose aplicada.

Quanto à segunda pergunta, a transição entre benefício e toxicidade é determinada principalmente pela dose, via de aplicação e propriedades físico-químicas das nanopartículas. Para ZnO aplicado via solo, doses até 160 mg/kg mostraram-se seguras e promotoras de crescimento, enquanto concentrações acima de 400 mg/kg associaram-se a estresse oxidativo, inibição radicular e prejuízos reprodutivos. Para Fe₂O₃ via foliar, doses até 50 mg/L demonstraram efeitos benéficos sobre nodulação, fixação biológica de nitrogênio e produtividade, com relatos de toxicidade microbiana em concentrações superiores.

Em relação à terceira pergunta, a matriz conceitual proposta (Tabela 8) organiza os estudos em cinco categorias funcionais, benéfico, tóxico, hormético, misto e descritivo, oferecendo critérios integrados para interpretar a literatura de forma mais consistente. A aplicação simultânea de critérios redox, funcional e simbiótico permite diferenciar respostas adaptativas de efeitos fitotóxicos com maior clareza.

Apesar das evidências consolidadas, a predominância de ensaios em condições controladas, a heterogeneidade de doses e a limitada padronização na caracterização das nanopartículas ainda restringem a extrapolação dos resultados para o campo. Recomenda-se que pesquisas futuras priorizem experimentos em ciclo completo, com doses padronizadas, caracterização físico-química rigorosa e avaliação integrada de produtividade, qualidade nutricional, fixação biológica de nitrogênio e impactos na microbiota do solo.

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Nanotecnologias**: subsídios para a problemática dos riscos e regulação. Responsável técnico: Oswaldo Luiz Alves. Brasília: ABDI, 2011. Disponível em: <http://lqes.iqm.unicamp.br>. Acesso em: 18 jan. 2026.

RAMOS, C. S. G.; ROCHA, J. L. A. Nanopartículas de óxidos de ferro e zinco e bioinoculantes como atenuantes do déficit hídrico na cultura do tomate. In: XXI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 2024, Campina Grande. Anais [...]. Campina Grande: UFCG, 2024.

AHMAD, P.; ALI, S.; ALI, A. et al. Zinc oxide nanoparticles alleviate oxidative stress and improve growth and photosynthetic attributes in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 19180–19196, 2022. DOI: [10.2174/1389203721666201016144848](https://doi.org/10.2174/1389203721666201016144848)

ALIDOUST, Darioush; ISODA, Akihiro. Effect of $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles on photosynthetic characteristic of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.): foliar spray versus soil amendment. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 12, p. 3365–3375, dez. 2013.

ALMEIDA, Patrícia do Socorro Pereira Macedo. Nanotecnologia: a revolução silenciosa na segurança do trabalho. Orientador: Jordan Del Nero. 2023. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16651>. Acesso em: 25 jan. 2026.

AROMATARIS, E.; LOCKWOOD, C.; PORRITT, K.; PILLA, B.; JORDAN, Z. (ed.). JBI manual for evidence synthesis. **JBI**, 2024. Disponível em: <https://synthesismanual.jbi.global>. DOI: 10.46658/JBIMES-24-01. Acesso em: 10 out. 2025.

BASIT, Farwa *et al.* Protective role of ZnO nanoparticles in soybean seedlings growth and stress management under Cr-enriched conditions. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 3, p. 703–716, jul. 2023.

BHAT, Javaid Akhter *et al.* Defense interplay of the zinc-oxide nanoparticles and melatonin in alleviating the arsenic stress in soybean (*Glycine max* L.). **Chemosphere**, v. 288, p. 132471, fev. 2022b.

BHAT, Javaid Akhter *et al.* Newly-synthesized iron-oxide nanoparticles showed synergetic effect with citric acid for alleviating arsenic phytotoxicity in soybean. **Environmental Pollution**, v. 295, p. 118693, fev. 2022a.

BHUSHAN, B. (Ed.). **Springer handbook of nanotechnology**. 4. ed. Berlin: Springer, 2017.

BILESKY-JOSÉ, Natália. **Síntese verde e avaliação de nanopartículas de ferro baseadas em *Trichoderma harzianum* visando aplicação na agricultura**. 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade de Sorocaba, Sorocaba, 2020. Disponível em: <https://repositorio.uniso.br/entities/publication/64170ae8-052d-4d00-9bff-2c91d920c06b>. Acesso em: 24 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Para aproximar laboratórios de nanotecnologia e empresas, SibratecNANO abre ciclo de submissão de projetos. Brasília, DF: MCTI, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/07/para-aproximar-laboratorios-de-nanotecnologia-e-empresas-sibratecnano-abre-ciclo-de-submissao-de-projetos>. Acesso em: 20 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Portaria MCTI nº 245, de 05 de abril de 2012. Institui o Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias – SisNANO. Brasília, DF: MCTI, 2012. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/incentivo_desenvolvimento/sisnano/arquivo-sisnano/PDF-3-Portaria-MCTIC-245-SisNANO.pdf. Acesso em: 17 jan. 2026.

BRIAT, J.-F.; DUBOS, C.; GAYMARD, F. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. **Trends in Plant Science**, v. 25, n. 5, p. 457–469, 2020. DOI: [10.1016/j.tplants.2014.07.005](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005)

CAO, Xuesong *et al.* Foliar Application with Iron Oxide Nanomaterials Stimulate Nitrogen Fixation, Yield, and Nutritional Quality of Soybean. **ACS Nano**, v. 16, n. 1, p. 1170–1181, 25 jan. 2022.

CENTRO DE TECNOLOGIAS ESTRATÉGICAS DO NORDESTE (CETENE). Nanotecnologia. Recife: CETENE, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cetene/pt-br/areas-de-atuacao/nanotecnologia>. Acesso em: 20 jan. 2026.

CHEN, Chun *et al.* Pristine and sulfidized zinc oxide nanoparticles alter bacterial communities and metabolite profiles in soybean rhizocompartments. **Science of The Total Environment**, v. 855, p. 158697, jan. 2023.

DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Nanofertilizers: new products for the industry? **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 26, p. 6462–6473, 2018. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.7b02150>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Importância socioeconômica da soja**. Brasília: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja>. Acesso em: 22 dez. 2025.

ERNST, Dávid *et al.* Appropriate agro-environmental strategy for ZnO-nanoparticle foliar application on soybean. **Soil Science Annual**, v. 75, n. 3, p. 1–10, 13 nov. 2024b.

ERNST, Dávid *et al.* Effects of Zinc Oxide and Zinc–Silica-Based Nanofertilizers with Yeasts on Selected Components of Soybean in the Central European Agronomic Region: A Short-Term Study. **Agronomy**, v. 14, n. 9, p. 2138, 20 set. 2024a.

FAIZAN, M., FARAZ, A., YUSUF, M., KHAN, S. T., & HAYAT, S. (2018). Zinc oxide nanoparticle-mediated changes in photosynthetic efficiency and antioxidant system of tomato plants. **Photosynthetica**, 56(2), 678-686. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0717-0>

FERREIRA, Hadma Sousa; RANGEL, Maria do Carmo. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 7, p. 1860-1870, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/PgKPCBdBMxgKq65zRk8SLwN/>. Acesso em: 19 jan. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAOSTAT: Crops and livestock products – soybean**. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 22 dez. 2025.

FRANCO, C. M.; LOOMIS, W. E. Absorção de fósforo e ferro, de soluções nutritivas. **Bragantia**, Campinas, v. 8, n. 1-4, p. 81-106, 1948. Tradução de: Plant Physiology, v. 22, p. 627-634, 1947. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/qGgbLzTNGhfSbVY7PBBHT3N/>. Acesso em: 1 fev. 2026.

FUNDACENTRO. Eric Drexler fará palestra na Fundacentro sobre nanotecnologias. São Paulo: Fundacentro, 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/fundacentro/pt-br/comunicacao/noticias/noticias/2008/5/eric-drexler-fara-palestra-na-fundacentro-sobre-nanotecnologias>. Acesso em: 14 jan. 2026.

GAM, Ho-Jun *et al.* Unlocking key factors and mechanistic insight of cadmium toxicity mitigation using green-synthesized ZnO nanoparticles in soybean through advanced metabolomics. **Environmental Technology & Innovation**, v. 40, p. 104422, nov. 2025.

GARCIA, Fernanda Ramos. Vigor de sementes de tomate nanocondicionadas com óxido de zinco em condições de déficit hídrico. 2025. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/47555>. Acesso em: 24 jan. 2026.

GARCÍA-LÓPEZ, J. I.; ZAVALA-GARCÍA, F.; OLIVARES-SÁENZ, E.; LIRA-SALDÍVAR, R. H.; DÍAZ BARRIGA-CASTRO, E.; RUIZ-TORRES, N. A.; RAMÍREZ-GODINA, F. Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. **Plants**, v. 8, n. 8, p. 254, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8080254>

GARRITY, Chantelle et al. **Cochrane Rapid Reviews Methods Group offers evidence-informed guidance to conduct rapid reviews**. Journal of Clinical Epidemiology, v. 130, p. 13-22, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2020.10.007>. Acesso em: 23 dez. 2025.

GOMES, Marcos Henrique Feresin. **Characterization of the foliar uptake of zinc sources by soybean (*Glycine max* L.)**. Doutorado Direto em Química na Agricultura e no Ambiente—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 22 out. 2021.

GUO, Yuantian *et al.* Fe₂O₃ nanoparticles enhance soybean resistance to root rot by modulating metabolic pathways and defense response. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 208, p. 106252, mar. 2025.

GUO, Yuantian *et al.* Fe₂O₃ nanoparticles enhance soybean resistance to root rot by modulating metabolic pathways and defense response. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, [s. l.], v. 208, p. 106252, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2024.106252>. Acesso em: 24 jan. 2026.

HAGHANINIA, Mohammad *et al.* Combined effects of zinc oxide nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on soybean yield, oil quality, and biochemical responses under drought stress. **Future Foods**, v. 11, p. 100594, jun. 2025.

HANIF, Saad *et al.* Harnessing the potential of zinc oxide nanoparticles and their derivatives as nanofertilizers: Trends and perspectives. **Plant Nano Biology**, [s. l.], v. 10, p. 100110, nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100110>. Acesso em: 1 fev. 2026.

HASHEMI, Shahla *et al.* Investigation of ZnO nanoparticles on proline, anthocyanin contents and photosynthetic pigments and lipid peroxidation in the soybean. **IET Nanobiotechnology**, v. 13, n. 1, p. 66–70, fev. 2019.

HOSSAIN, Zahed *et al.* Insights into the proteomic response of soybean towards Al₂O₃, ZnO, and Ag nanoparticles stress. **Journal of Hazardous Materials**, v. 304, p. 291–305, mar. 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TR 18401:2017 – Nanotechnologies: Plain language explanation of selected terms from the ISO/IEC 80004 series**. Geneva: ISO, 2017. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:18401:ed-1:v1:en>. Acesso em: 05 jan. 2026.

JAVED, R., KHAN, B., SHARAFAT, U., BILAL, M., GALAGEDARA, L., ABBEY, L., & CHEEMA, M. (2024). Dynamic interplay of metal and metal oxide nanoparticles with plants: Influencing factors, action mechanisms, and assessment of stimulatory and inhibitory effects. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 271, 115992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115992>

JIA, Juntao *et al.* Mitigating Cadmium Stress in Soybean Plants: Seed Priming with Nanoscale TiO₂ and ZnO for Safer Crop Production. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 73, n. 30, p. 18602–18616, 30 jul. 2025.

KAH, M.; TUFENKJI, N.; WHITE, J. C. Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. **Nature Nanotechnology**, v. 14, p. 532–540, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0439-5>

KARMOUS, Ines *et al.* Plant-engineered ZnO and CuO nanoparticles exhibit pesticidal activity and mitigate Fusarium infestation in soybean: A mechanistic understanding. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 221, p. 109672, abr. 2025.

KHANIZADEH, M.; GHORBANI, M.; MOGHADDAM, S. S.; HOSSEINI, S. M. Effects of iron oxide nanoparticles on growth, antioxidant capacity, and secondary metabolites of plants under different concentrations. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 43, p. 1–15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11003-1>

KOBAYASHI, T.; NISHIZAWA, N. K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, p. 131–152, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105522>

KRESLAVSKI, V., IVANOV, A., SHMAREV, A., KHUDYAKOVA, A., & KOSOBRYUKHOV, A. (2022). Influence of iron nanoparticles (Fe₃O₄ and Fe₂O₃) on the growth, photosynthesis and antioxidant balance of wheat plants (*Triticum aestivum*). In **BIO Web of Conferences** (Vol. 42, p. 01023). EDP Sciences. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224201023>

KUMAR, Y., TIWARI, K. N., SINGH, T., & RALIYA, R. (2021). Nanofertilizers and their role in sustainable agriculture. **Annals of Plant and Soil Research**, 23(3), 238-255. DOI: <https://doi.org/10.47815/apr.2021.10067>

LI, L., HUANG, Z., ZHOU, Z., TAO, Y., ZHANG, Y., MU, Y., ... & NIE, L. (2025). Foliar application of zinc oxide nanoparticles improved yield and 2-acetyl-1-pyrroline content in fragrant rice under salt stress. **Crop and Environment**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crope.2025.03.004>

LINH, Tran My *et al.* Metal-Based Nanoparticles Enhance Drought Tolerance in Soybean. **Journal of Nanomaterials**, v. 2020, p. 1–13, 20 jun. 2020.

LÓPEZ-MORENO, Martha L. *et al.* Evidence of the Differential Biotransformation and Genotoxicity of ZnO and CeO₂ Nanoparticles on Soybean (*Glycine max*) Plants. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 19, p. 7315–7320, 1 out. 2010.

LV, J., CHRISTIE, P., & ZHANG, S. (2019). Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: recent advances and methodological challenges. **Environmental Science: Nano**, 6(1), 41-59. DOI: [10.1039/C8EN00645H](https://doi.org/10.1039/C8EN00645H)

MA, Y., HE, X., ZHANG, P., ZHANG, Z., GUO, Z., TAI, R., ... & CHAI, Z. (2011). Phytotoxicity and biotransformation of La₂O₃ nanoparticles in a terrestrial plant cucumber (*Cucumis sativus*). **Nanotoxicology**, 5(4), 743-753. DOI: <https://doi.org/10.3109/17435390.2010.545487>

MASSRUHÁ, S. M. F. S. et al. A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S. et al. (ed.). **Agricultura digital: tecnologias relevantes para o setor agrícola brasileiro**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 1, p. 16-33. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126214/a->

transformacao-digital-no-campo-rumo-a-agricultura-sustentavel-e-inteligente. Acesso em: 1 fev. 2026.

MAYRINCK, C.; RAPHAEL, E.; FERRARI, J. L.; SCHIAVON, M. A. Síntese, Propriedades e Aplicações de Óxido de Zinco Nanoestruturado. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 5, p. 1185-1204, out. 2014. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/download/629/501>. Acesso em: 21 jan. 2026.

MELAZZO, Gabriela Mariano. Qualidade fisiológica e sanitária de sementes de soja tratadas com nanopartículas de óxido de zinco no armazenamento. 2025. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

MGADI, K., NDABA, B., ROOPNARAIN, A., RAMA, H., & ADELEKE, R. Nanoparticle applications in agriculture: overview and response of plant-associated microorganisms. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1354440, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1354440>

MONTANHA, Gabriel Sgarbiero *et al.* Zinc nanocoated seeds: an alternative to boost soybean seed germination and seedling development. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 5, p. 857, maio 2020.

MUSTAFA, Ghazala *et al.* Bio-Synthesized Nanoflowers and Chemically Synthesized Nanowires Zinc-Oxide induced Changes in the Redox and Protein Folding in Soybean Seedlings: a Proteomic Analysis. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 4, p. 2570–2584, abr. 2023.

NETA, Marina Alves de Freitas; MARENCO, Ricardo; JESUS, Simone Verdes de. Caracterização estomática em cinco espécies florestais da Amazônia. In: REUNIÃO REGIONAL DA SBPC EM BOA VISTA, 2006, Boa Vista. Resumos... São Paulo: SBPC, 2006. Disponível em: <http://www.sbpnet.org.br/livro/boavista/resumos/1163.htm>. Acesso em: 1 fev. 2026.

NIKZAD, S., SHARAFI, S., HAMZE, H. et al. Investigating the effect of foliar spraying of zinc nanoparticles and biostimulants on modulating the effect of water deficit stress in sugar beet by using Integrated Biomarker Response Version 2. **Sci Rep** 15, 37780 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19912-9>

OLIVEIRA JÚNIOR, Rudimar Risso de. Nanopartículas inorgânicas como uma abordagem biotecnológica na segurança das culturas de milho, soja e trigo. *Revista Sistema Plantio Direto*, n. 1567, 18 ago. 2025. Disponível em: <https://www.plantiodireto.com.br/artigos/1567>. Acesso em: 21 jan. 2026.

OTUBO, Larissa. **Técnicas de caracterização de nanopartículas metálicas funcionalizadas**. 2005. Monografia (Exame Geral de Qualificação de Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em: <http://lqes.iqm.unicamp.br>. Acesso em: 20 jan. 2026.

PERALTA-VIDEA, Jose R. *et al.* Cerium dioxide and zinc oxide nanoparticles alter the nutritional value of soil cultivated soybean plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 80, p. 128–135, jul. 2014.

PERÉZ, Cristian D. P. *et al.* Metalloid and Metal Oxide Nanoparticles Suppress Sudden Death Syndrome of Soybean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 1, p. 77–87, 8 jan. 2020.

PONTES, Brenda. **Nanopartículas no tratamento e controle de fungos fitopatogênicos em sementes de soja armazenadas**. [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 26 fev. 2025.

PRIESTER, John H. *et al.* Damage assessment for soybean cultivated in soil with either CeO₂ or ZnO manufactured nanomaterials. **Science of The Total Environment**, v. 579, p. 1756–1768, fev. 2017.

PRIESTER, John H. *et al.* Soybean susceptibility to manufactured nanomaterials with evidence for food quality and soil fertility interruption. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 37, 11 set. 2012.

RAI, P. K.; KUMAR, V.; LEE, S. S. *et al.* Nanoparticle–plant interaction: implications in energy, environment, and agriculture. **Environmental Research**, v. 194, 2018. DOI: [10.1016/j.envint.2018.06.012](https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.06.012)

RALIYA, R.; SAHARAN, V.; DIMKPA, C.; BISWAS, P. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 26, p. 6487–6503, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178>

RICO, C. M.; MAJUMDAR, S.; DUARTE-GARDEA, M. *et al.* Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 8, p. 3485–3498, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf104517j>

RODRIGUES, Ana Cláudia; AMANO, Érika; ALMEIDA, Sérgio Luiz de. Anatomia Vegetal. Florianópolis: UFSC/UAB, 2015. Disponível em: <https://antigo.uab.ufsc.br/biologia/files/2020/08/Anatomia-Vegetal.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2026.

SANTÁS-MIGUEL, V., ARIAS-ESTÉVEZ, M., RODRÍGUEZ-SEIJO, A., & ARENAS-LAGO, D. (2023). Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination. **Environmental Pollution**, 334, 122222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122222>

SENA, Eduardo da Silva. **Enriquecimento de plantas com nanopartículas de ferro: uma revisão bibliográfica**. 2023. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) – Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas, Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/server/api/core/bitstreams/73a3ab5d-a76f-4e22-9c98-0ba47305669d/content>. Acesso em: 19 jan. 2026.

SHIRVANI-NAGHANI, Shahin *et al.* Drought stress mitigation and improved yield in Glycine max through foliar application of zinc oxide nanoparticles. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 27898, 13 nov. 2024.

SIDDIQI, K. S., & HUSEN, A. (2017). Plant response to engineered metal oxide nanoparticles. *Nanoscale research letters*, 12(1), 92.

SINGH, K. A. *et al.* Atomic vacancies of molybdenum disulfide nanoparticles stimulate mitochondrial biogenesis. *Nature Communications*, [s. l.], v. 15, n. 8136, p. 1-14, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52276-8>. Acesso em: 21 jan. 2026.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. DOI:10.1186/s11671-017-1861-y

TRICCO, A. C.; LILLIE, E.; ZARIN, W. *et al.* PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. **Annals of Internal Medicine**, v. 169, n. 7, p. 467–473, 2018. Disponível em: <https://www.prisma-statement.org/scoping>. DOI: 10.7326/M18-0850. Acesso em: 25 out. 2025.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; SINGH, V. P. *et al.* An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 110, p. 2–12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.030>

WANG, P., LOMBI, E., ZHAO, F. J., & KOPITKE, P. M. (2016). Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. **Trends in plant science**, 21(8), 699-712. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.04.005

WANG, P., MENZIES, N. W., LOMBI, E., MCKENNA, B. A., JOHANNESSEN, B., GLOVER, C. J., ... & KOPITKE, P. M. (2013). Fate of ZnO nanoparticles in soils and cowpea (*Vigna unguiculata*). **Environmental science & technology**, 47(23), 13822-13830. DOI:10.1021/es403466p

YADAV, Achchhelal *et al.* Zinc oxide and ferric oxide nanoparticles combination increase plant growth, yield, and quality of soybean under semiarid region. **Chemosphere**, v. 352, p. 141432, mar. 2024.

YANG, Xueling; ALIDOUST, Darioush; WANG, Chunyan. Effects of iron oxide nanoparticles on the mineral composition and growth of soybean (*Glycine max* L.) plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 42, n. 8, p. 128, ago. 2020.

YOON, Sung-Ji *et al.* Zinc oxide nanoparticles delay soybean development: A standard soil microcosm study. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 100, p. 131–137, fev. 2014.

YUSEFI-TANHA, Elham *et al.* Addressing global food insecurity: Soil-applied zinc oxide nanoparticles promote yield attributes and seed nutrient quality in *Glycine max* L. **Science of The Total Environment**, v. 876, p. 162762, jun. 2023.

YUSEFI-TANHA, Elham *et al.* Responses of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) to zinc oxide nanoparticles: Understanding changes in root system architecture, zinc tissue partitioning and soil characteristics. **Science of The Total Environment**, v. 835, p. 155348, ago. 2022.

YUSEFI-TANHA, Elham *et al.* Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) as a novel nanofertilizer: Influence on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. Kowsar). **Science of The Total Environment**, v. 738, p. 140240, out. 2020.

ZEESHAN, Muhammad *et al.* Amelioration of AsV toxicity by concurrent application of ZnO-NPs and Se-NPs is associated with differential regulation of photosynthetic indexes, antioxidant pool and osmolytes content in soybean seedling. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 225, p. 112738, dez. 2021.

ZHANG, Erfang; LIU, Li Jiao. Iron oxide nanoparticles affect plant growth by negatively regulating soil bacterial community. **South African Journal of Botany**, v. 174, p. 410–419, nov. 2024.

ZHANG, Taiming *et al.* Iron–Integrated Nitrogen–Rich Nanocarriers Boost Symbiotic Nitrogen Fixation and Growth in Soybean (*Glycine max*). **Nanomaterials**, v. 15, n. 18, p. 1453, 21 set. 2025.

ZUVERZA-MENA, N., MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, D., DU, W., HERNANDEZ-VIEZCAS, J. A., BONILLA-BIRD, N., LÓPEZ-MORENO, M. L., ... & GARDEA-TORRESDEY, J. L. (2017). Exposure of engineered nanomaterials to plants: Insights into the physiological and biochemical responses-A review. **Plant Physiology and Biochemistry**, 110, 236-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.037>

ANEXO – REGISTRO DO PROTOCOLO NA OSF: DOI 10.17605/OSF.IO/BYDSJ



Home

Search OSF

Support

Projects

Project details

Overview

Metadata

Files

Wiki

Registrations

Analytics

Linked Services

Registries

Preprints

Meetings

Institutions

Bydsj / Overview

Sign in

Nanotechnology Applied To Soybeans: The Functional Potential Of Zinc Oxide (ZnO) And Iron Oxide (Fe₂O₃) Nanoparticles – A Scoping Review

Public Project

Wiki

Click the "Edit" to add important information, links, or images here to describe your project.

Files Preview

Nanotechnology Applied To Soybeans: The Functional Potential Of Zinc Oxide (ZnO) And Iron Oxide (Fe₂O₃) Nanoparticles – A Scoping R... ▾

OSF Storage

Protocolo Scoping Review.PDF	3 Downloads	246.9 kB	Dec 20, 2025 02:57 PM
Scoping Review 2.0.pdf	17 Downloads	273.7 kB	Jan 4, 2026 12:48 AM

Metadata

Contributors

Josiel Ferreira Lima, Alan Carlos da Costa, Aimee Karla Moraes Leao

Description

This record describes the adapted protocol for a scoping review following the Joanna Briggs Institute (JBI) guidelines and reported according to the PRISMA-SCR checklist. Its objective is to map and organize the scientific...

Read more

Supplements

No supplements

Date Created

Dec 20, 2025, 2:46 PM

Date Updated

Jan 4, 2026, 12:53 AM

License

CC-BY Attribution 4.0 International

Project DOI

10.17605/OSF.IO/BYDSJ