www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 164, 2026 | DOI: 10.69849/8hvf2k74

Resposta diferencial de preparações contendo prata obtidas por síntese biogênica em Raphanus sativus. Implicações para a triagem bioherbicida

Differential response of silver-containing preparations obtained by biogenic synthesis in Raphanus sativus. Implications for bioherbicide screening

Beatriz Zani Santos[1]

Renata de Lima[2]

Resumo

As nanopartículas de prata sintetizadas por via biogênica têm sido investigadas como preparações de base natural para o manejo de plantas, mas a resposta vegetal depende da formulação, da dose, da rota de exposição e do desfecho avaliado. Este estudo realizou uma triagem exploratória de uma suspensão de AgNPs obtida a partir de hidrolato comercial de *Eucalyptus citriodora*, utilizando *Raphanus sativus* como espécie-modelo. A caracterização inicial por NTA indicou uma concentração de $1,66 \times 10^9$ partículas mL^{-1}, valor utilizado como referência para o preparo dos tratamentos, enquanto o DLS indicou um diâmetro hidrodinâmico de 80,30 nm, PDI de 0,199 e potencial zeta de -19,9 mV. As sementes foram pré-tratadas e distribuídas em papel de germinação, com quatro repetições, cada uma com dez sementes. O comprimento radicular, a emergência e o índice de germinação diferiram entre os tratamentos. As AgNPs reduziram o comprimento radicular condicional em relação ao controle nas três proporções testadas, enquanto o $AgNO_3$ aumentou esse comprimento. Na avaliação com folhas destacadas, a massa fresca diferiu globalmente, e o $AgNO_3$ a 100% apresentou a maior redução em relação ao controle, com diferença ajustada pelo teste de Holm. Na pulverização pós-emergência, a AgNP 25% aumentou o comprimento radicular, enquanto $AgNO_3$ 25% e 50% reduziram. A parte aérea também apresentou respostas distintas

[1] Laboratório de Avaliação de Bioatividade e Toxicologia de Nanomateriais (LABITON), Universidade de Sorocaba, Sorocaba, São Paulo, Brasil.

[2] Laboratório de Avaliação de Bioatividade e Toxicologia de Nanomateriais (LABITON), Universidade de Sorocaba, Sorocaba, São Paulo, Brasil. Autora correspondente. Renata de Lima. renata.lima@prof.uniso.br

entre os grupos. As AgNPs biogênicas não foram, em geral, superiores ao $AgNO_3$ ou ao hidrolato como supressores de rabanete, porém, mostram claramente alterações na aparência da planta, como coloração amarelada e aspecto desidratado. O estudo sustenta a utilidade da suspensão para a triagem controlada de fitotoxicidade, mas não demonstra, por si só, a eficácia bioherbicida agronômica, a seletividade ou o mecanismo de ação.
Palavras-chave. nanopartículas de prata; síntese biogênica; fitotoxicidade; Raphanus sativus; triagem bioherbicida.

Abstract

Researchers have investigated biologically synthesized silver nanoparticles (AgNPs) as natural-based preparations for plant management; however, plant responses depend on the formulation, dosage, route of exposure, and the specific outcome being evaluated. This study conducted an exploratory screening of an AgNP suspension obtained from a commercial *Eucalyptus citriodora* hydrosol, using *Raphanus sativus* (radish) as a model species. Initial characterization via Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) indicated a concentration of 1.66×10^9 particles mL^{-1}, which served as a reference for preparing the treatments. Dynamic Light Scattering (DLS) analysis revealed a hydrodynamic diameter of 80.30 nm, a polydispersity index (PDI) of 0.199, and a zeta potential of -19.9 mV. Seeds were pre-treated and placed on germination paper, with four replicates of ten seeds each. Root length, emergence, and the germination index varied across treatments. The AgNPs reduced root length compared to the control at all three tested concentrations, whereas $AgNO_3$ increased it. In the detached-leaf assessment, fresh mass varied significantly overall; the 100% $AgNO_3$ treatment showed the greatest reduction relative to the control (differences adjusted using the Holm test). In post-emergence foliar application, the 25% AgNP treatment increased root length, while 25% and 50% $AgNO_3$ treatments decreased it. The aerial parts also exhibited distinct responses across the experimental groups. Overall, biogenic AgNPs did not outperform $AgNO_3$ or the hydrosol in suppressing radish growth; however, they clearly altered plant appearance, causing yellowing and a dehydrated, withered look. The study supports the suspension's utility for controlled phytotoxicity screening, but it does not, by itself, demonstrate agronomic bioherbicidal efficacy, selectivity, or the mechanism of action.
Keywords. silver nanoparticles; biogenic synthesis; phytotoxicity; Raphanus sativus; bioherbicide screening.

1 Introdução

A busca por alternativas aos herbicidas convencionais acompanha a necessidade de reduzir a persistência ambiental, a exposição de organismos não-alvo e a seleção de populações resistentes. Nanoformulações e produtos de base natural são estudados porque podem modificar a deposição, a adesão e a liberação de substâncias biologicamente ativas. Essa mesma propriedade pode ampliar a interação com organismos não-alvo. O tamanho, a forma, a superfície, o recobrimento, a composição, o meio e a via de aplicação modulam a biodisponibilidade e a fitotoxicidade de nanomateriais em plantas (Balusamy et al., 2023; Campos et al., 2023; Liu et al., 2024).

A síntese biogênica de nanopartículas de prata utiliza matrizes biológicas como fontes de compostos redutores e estabilizantes. A rota pode produzir partículas recobertas por biomoléculas, com comportamento coloidal distinto daquele observado em preparações obtidas por síntese química. Entretanto, o termo "biogênica" não implica ausência de toxicidade. A composição do recobrimento, a agregação, a dissolução de Ag^{+} e os componentes residuais da matriz podem alterar a resposta biológica (Guilger et al., 2017; Budhani et al., 2019; Tripathi et al., 2024).

Em *Raphanus sativus*, a germinação pode permanecer preservada enquanto o comprimento radicular e a parte aérea são reduzidos, o que indica que o crescimento inicial e a emergência não são *endpoints* equivalentes (Zuverza-Mena et al., 2016; Tymoszuk, 2021). Outros estudos indicam respostas não monotônicas, em que faixas baixas ou intermediárias podem estimular alguns parâmetros, enquanto doses mais altas podem inibir o crescimento. O sentido da resposta depende da espécie, do genótipo, do meio, da formulação e do tempo de exposição (Koley et al., 2023; Tripathi et al., 2024).

A utilização de controle com $AgNO_3$ é necessária porque as AgNPs podem liberar Ag^{+}, mas também podem interagir como partículas. Estudos em plantas mostram que AgNPs podem ser mais inibitórias, semelhantes ou menos tóxicas que o $AgNO_3$, dependendo do tamanho, do recobrimento, da espécie, do meio e da dose efetivamente disponível (Yin et al., 2011; Vannini et al., 2013; Ziotti et al., 2021; Iannelli et al., 2022). A pulverização também não se limita à retenção superficial. A entrada foliar depende da cutícula, dos estômatos, das propriedades de superfície, do meio e da transformação do material (Wu et al., 2020; Avellan et al., 2021; Pinna; Husted, 2025).

Neste estudo, *R. sativus* foi utilizado como espécie-modelo para uma triagem de atividade bioherbicida. Foram comparados AgNPs biogênicos, $AgNO_3$ e hidrolato de

Eucalyptus citriodora no pré-tratamento de sementes, no tratamento de folhas destacadas e na pulverização pós-emergência. O objetivo foi verificar se as AgNPs produziriam uma supressão mais consistente do crescimento do rabanete do que os controles. A hipótese foi tratada de forma exploratória, sem pressupor equivalência molar entre as preparações e sem converter a redução do crescimento em mortalidade.

2 Materiais e métodos

2.1 Preparação e caracterização

A síntese foi iniciada com $AgNO_3$ a 1 mM e com hidrolato comercial de *Eucalyptus citriodora*. O hidrolato comercial foi adquirido da Legeé Óleos Essenciais e Compostos Ltda. e utilizado como recebido (Legeé Óleos Essenciais e Compostos Ltda., [s. d.]). A composição quantitativa dos constituintes do lote utilizado não foi determinada. O hidrolato foi combinado com o precursor de prata sob agitação a 600 rpm. Para ajuste do pH a 12, foi utilizado NaOH a 1 M. A suspensão permaneceu em agitação à temperatura ambiente por 78 horas, observando-se uma mudança de coloração para marrom-escuro.

O lote foi caracterizado por rastreamento de nanopartículas, DLS e mobilidade eletroforética. A análise por NTA foi realizada em um equipamento NanoSight LM14, com câmera e software NanoSight v.2.3. A amostra foi diluída 100 vezes e foram realizadas cinco leituras. O DLS e o potencial zeta foram medidos em um equipamento ZetaSizer Nano ZS 90, com três leituras a 25 °C e ângulo de 90°.

As medidas disponíveis não permitem inferir a morfologia, a fase cristalina, a composição elementar, o estado de oxidação, o teor total de prata ou a fração dissolvida. DLS, PDI e potencial zeta descrevem a dispersão sob as condições de medida e, isoladamente, não constituem prova de estabilidade no meio biológico ou de mecanismo de fitotoxicidade (Bhattacharjee, 2016; Cascio et al., 2014).

2.2 Preparações e concentrações

As AgNPs foram expressas como número de partículas por volume. A concentração de $1{,}66 \times 10^{9}$ partículas mL^{-1}, determinada por NTA imediatamente antes dos bioensaios, serviu de referência para o preparo de todas as diluições. Na germinação, as proporções de 2,5%, 3,5% e 5% corresponderam a $4{,}15 \times 10^{7}$, $5{,}81 \times 10^{7}$ e $8{,}30 \times 10^{7}$ partículas mL^{-1},

respectivamente. Nos ensaios foliar e de pulverização, as proporções de 25%, 50% e 100% corresponderam a $4{,}15 \times 10^{8}$, $8{,}30 \times 10^{8}$ e $1{,}66 \times 10^{9}$ partículas mL^{-1}, respectivamente.

O controle químico foi preparado a partir de $AgNO_3$ a 1 mM, sem formação de nanopartículas. Na germinação, as proporções de 2,5%, 3,5% e 5% corresponderam a 0,025, 0,035 e 0,050 mM. Nos ensaios foliares e de pulverização, as proporções de 25%, 50% e 100% corresponderam a 0,25, 0,50 e 1,00 mM. O hidrolato foi diluído em água nas mesmas proporções volumétricas de cada ensaio. Como os materiais estão expressos em unidades diferentes, essas proporções padronizam o preparo operacional e não correspondem a doses equimolares de prata.

2.3 Germinação, emergência e índice de germinação

Foram utilizadas sementes de *Raphanus sativus* L., cultivar Crimson Gigante (MV), comercializadas pela Agristar do Brasil Ltda., sob a marca Micro Verde, pertencentes ao lote 109818, com germinação declarada de 90% e pureza de 99%. Identificadas pelo fornecedor como importadas, com validade até março de 2027.

As sementes foram submetidas à assepsia em etanol a 70% por 5 minutos e lavadas duas vezes em água destilada estéril por 1 minuto. Para cada repetição, dez sementes foram colocadas em saco separado com 500 µL do tratamento. Posteriormente, os sacos foram agitados para promover a distribuição homogênea das soluções sobre a superfície das sementes. Após essa etapa, as sementes foram submetidas à secagem em temperatura ambiente, no interior de uma cabine de fluxo laminar em funcionamento, sob fluxo de ar filtrado, por 2 horas, a fim de manter condições assépticas e minimizar possíveis contaminações durante o teste. O controle recebeu 500 µL de água e passou pelo mesmo procedimento.

Após a secagem, as sementes foram distribuídas em unidades de papel de germinação separadas, previamente umedecidas com 12 mL de água estéril. A incubação ocorreu em câmara BOD a 20 °C, com fotoperíodo de 12 h por 7 dias. Foram avaliados dez grupos, com quatro repetições independentes em cada um. A unidade experimental foi a repetição com 10 sementes.

A emergência foi definida pela emissão visível da radícula e calculada como a proporção de sementes germinadas em cada repetição. O comprimento radicular condicional foi calculado apenas entre as sementes germinadas. O índice de germinação foi calculado

como o produto da emergência relativa e do comprimento radicular condicional relativo, dividido por 100. A média de cada repetição foi utilizada na análise inferencial.

2.4 Ensaio com folhas destacadas

Plantas de *R. sativus* foram cultivadas até o estádio de duas folhas e tiveram as folhas destacadas ao nível do pecíolo. Cada tratamento teve seis folhas, e cada folha recebeu, individualmente, 2 mL da respectiva preparação, uma única vez, no início do ensaio, aplicada sobre algodão envolto ao pecíolo. As folhas foram mantidas na bandeja, com tratamentos individuais, sobre papel de germinação umedecido com 30 mL de água ultrapura estéril. O ensaio ocorreu em BOD a 27 °C, com fotoperíodo de 16 horas de luz e 8 horas de escuridão, ao longo de 5 dias. A massa fresca individual foi registrada em gramas.

O ensaio incluiu controle, AgNPs a 25%, 50% e 100%; hidrolato a 25%, 50% e 100%; e $AgNO_3$ a 25%, 50% e 100%. A eficácia de controle foi calculada de forma descritiva conforme a equação 1. Essa métrica foi apresentada como efeito relativo e não foi interpretada como mortalidade.

$$Eficácia = \frac{100 \times (massa\ fresca\ do\ controle - massa\ fresca\ do\ tratamento)}{massa\ fresca\ do\ controle} \qquad \text{equação 1}$$

2.5 Pulverização em pós-emergência

Plântulas de *R. sativus* foram cultivadas em substrato até o início da aplicação dos tratamentos. O delineamento final foi composto por dez grupos, com oito plantas por grupo, totalizando 80 plantas. Foram utilizadas quatro bandejas de polipropileno com 24 células cada, totalizando 80 células. Cada célula foi preenchida com uma mistura de solo e substrato e recebeu sementes de *Raphanus sativus*. Após a emergência, realizou-se o desbaste, mantendo-se uma planta por célula. As 80 plantas foram distribuídas entre os tratamentos experimentais, com oito células, correspondentes a oito plantas, por tratamento.

As plantas receberam água mineral durante os nove primeiros dias. Nos cinco dias finais, receberam uma aplicação diária de 2 mL da preparação correspondente por planta, totalizando 5 aplicações. O controle recebeu água mineral no mesmo volume e na mesma frequência. Os tratamentos foram: AgNPs a 25%, 50% e 100%; $AgNO_3$ a 25%, 50% e 100%;

e hidrolato a 25%, 50% e 100%. Ao final do período experimental, foram medidos os comprimentos do sistema radicular e da parte aérea. Sintomas visuais foram registrados qualitativamente.

2.6 Análise estatística

Foram calculadas médias, desvios-padrão e intervalos de confiança de 95% na unidade experimental apropriada. A germinação foi analisada com quatro repetições por tratamento. As folhas destacadas e a pulverização foram analisadas com a folha ou a planta individual como unidade experimental, conforme o delineamento. Foram calculados a ANOVA de uma via, o teste de Brown-Forsythe e a ANOVA de Welch. As comparações exploratórias contra o controle utilizaram testes de Welch com ajuste de Holm. Adotou-se 5% como nível de decisão. Os resultados foram interpretados em conjunto com a dispersão e os intervalos de confiança.

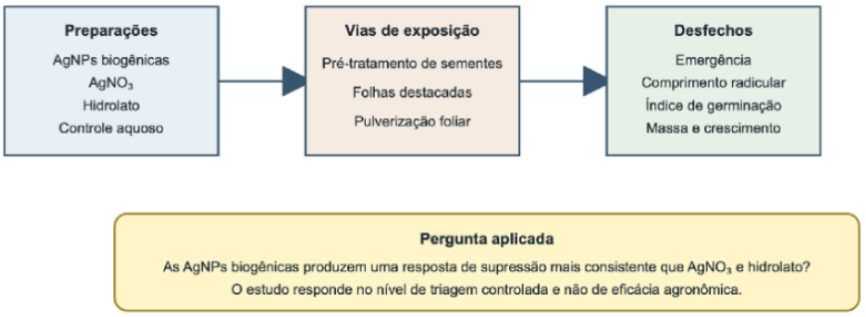
2.7 Critério de interpretação bioherbicida

Raphanus sativus foi utilizado como espécie-modelo para triagem de atividade bioherbicida. Nesse contexto, a resposta desejada seria uma redução consistente na germinação, no crescimento ou na sobrevivência após a exposição. Como o estudo reiniciado não inclui uma cultura agrícola comparadora, a interpretação se limita à supressão exploratória do rabanete e não permite avaliar a seletividade entre a planta daninha e a cultura.

2.8 Fluxograma de atividade

Um resumo das atividades é mostrado na Figura 1 para melhor compreensão das atividades realizadas.

Figura 1 - Estrutura experimental da triagem e lógica de interpretação.



3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização da suspensão e implicações para a interpretação

A caracterização físico-química inicial (Tabela 1), mostra os resultados obtidos das análises de NTA, indicou uma concentração de 1,66 × 10^9 partículas/mL. A análise por espalhamento dinâmico de luz (DLS) obteve um diâmetro hidrodinâmico de 80,30 nm e um PDI de 0,199. O potencial zeta foi de -19,9 mV. NTA e DLS foram tratados como técnicas complementares, pois fornecem distribuições e ponderações distintas (Filipe; Hawe; Jiskoot, 2010; Kim et al., 2019).

Tabela 1 – Resultados das análises de caracterização das nanopartículas.

Nanopartícula	NTA		DLS		
	Concentração NP/mL	Diâmetro (nm)	Diâmetro (nm)	PDI	Potencial Zeta (mV)
AgNP	1,66 x 10^9	141	80,30	0,199	-19,9

A síntese biogênica não permite atribuir o efeito apenas ao rótulo verde, pois o recobrimento, os resíduos do hidrolato, a agregação e a dissolução de Ag^+ podem variar entre os lotes. A superfície e o recobrimento alteram a resposta vegetal mesmo com tamanho nominal semelhante (Matras et al., 2022; Peharec Štefanić et al., 2021). A composição quantitativa do hidrolato comercial de *E. citriodora*, utilizado como matriz, não foi determinada; portanto, não é possível avaliar sua bioatividade. Estudos com frações aquosas voláteis de eucaliptos e revisões sobre hidrolatos relatam atividades biológicas em matrizes vegetais (Zhang et al., 2014; Almeida et al., 2024), mas não permitem inferir a composição ou a fitotoxicidade do produto comercial utilizado neste estudo.

3.2 Germinação, emergência e índice de germinação

O comprimento radicular condicional diferiu entre os dez grupos. A heterogeneidade foi detectada pelo teste de Brown–Forsythe, com $F(9,30) = 14,08$ e $p < 0,001$. Por essa razão, a ANOVA de Welch foi priorizada e indicou um efeito global, com $F(9, 11,80) = 2,09 \times 10^6$ e $p < 0,001$. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das análises de comprimento radicular

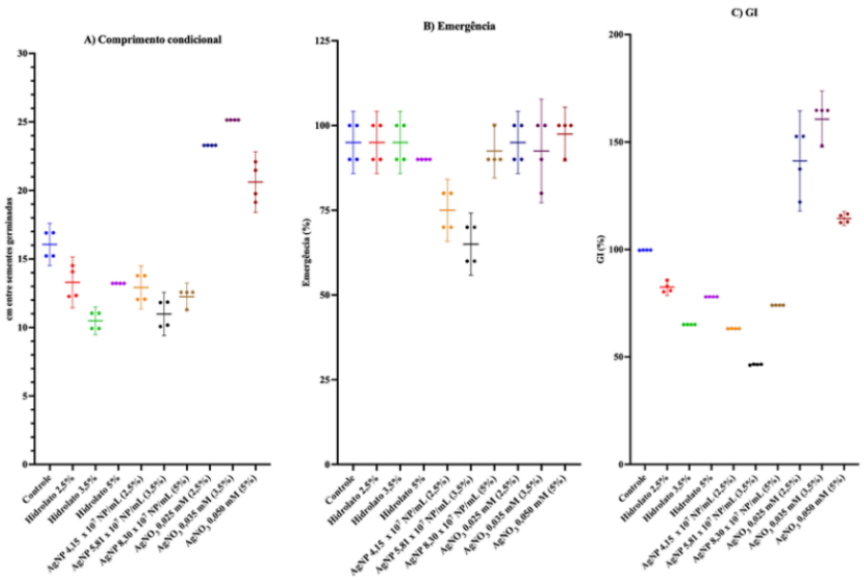
Grupo	n	Comprimento média ± DP	IC95%
Controle	4	16,07 ± 0,97	14,52–17,61
Hidrolato 2,5%	4	13,30 ± 1,16	11,45–15,15
Hidrolato 3,5%	4	10,49 ± 0,64	9,47–11,51
Hidrolato 5%	4	13,23 ± 0,00	13,22–13,23
AgNP 2,5%	4	12,92 ± 0,99	11,34–14,50
AgNP 3,5%	4	10,98 ± 0,99	9,40–12,56
AgNP 5%	4	12,25 ± 0,63	11,25–13,25
$AgNO_3$ 2,5%	4	23,30 ± 0,01	23,29–23,31
$AgNO_3$ 3,5%	4	25,15 ± 0,00	25,14–25,15
$AgNO_3$ 5%	4	20,62 ± 1,39	18,41–22,83

Todas as comparações com o controle (Figura 2) permaneceram ajustadas pelo método de Holm. As AgNPs reduziram o comprimento em aproximadamente 19,6%, 31,0% e 23,8%, enquanto o hidrolato reduziu em 17,2%, 34,8% e 17,7%. O $AgNO_3$ aumentou o comprimento em 45,0%, 56,5% e 28,3%.

A emergência (Figura 3B) também diferiu globalmente, com $F(9,11) = 9,30$ e $p = 0,0005$ na ANOVA de Welch. O controle e os hidrolatos a 2,5% e 3,5% apresentaram 95% de emergência média. O hidrolato a 5% apresentou 90% de emergência. As AgNPs apresentaram 75%, 65% e 92,5%. Apenas as proporções de 2,5% e 3,5% de AgNPs permaneceram inferiores ao controle após o teste de Holm, com diferenças de 20 e 30 pontos percentuais, respectivamente. O $AgNO_3$ apresentou 92,5%, 97,5% e 85%, sem diferença significativa ajustada por contraste em relação ao controle.

O índice de germinação (Figura 2C) diferiu globalmente, com $F(9, 11,82) = 1,65 \times 10^5$ e $p < 0,001$. O controle apresentou valor médio de 99,72%. Os valores foram de 82,46%, 65,10% e 77,99% para o hidrolato; 63,21%, 46,49% e 74,09% para as AgNPs; e 141,18%, 160,64% e 114,43% para o $AgNO_3$, nas proporções crescentes. O menor valor foi observado para AgNP 3,5%. A classificação descritiva por faixas de GI sugere um maior comprometimento relativo para AgNP (3,5%), mas não deve ser convertida em diagnóstico de mortalidade ou em um limiar universal de fitotoxicidade.

Figura 2. Comprimento radicular condicional, emergência e índice de germinação após sete dias. Cada ponto representa uma repetição, e cada repetição foi calculada com base em 10 sementes. As barras representam IC95%.



O conjunto de desfechos indica que a emergência e o crescimento radicular não responderam da mesma forma. Esse padrão é coerente com estudos em rabanete nos quais a porcentagem de germinação permaneceu preservada, enquanto o comprimento radicular, a parte aérea ou a massa foram alterados (Zuverza-Mena et al., 2016; Tymoszuk, 2021).

Em outras espécies, respostas não monotônicas também foram associadas à dose, à superfície e ao meio de exposição (Koley et al., 2023; Tripathi et al., 2024). Neste experimento, a direção observada foi compatível com a supressão inicial pelo hidrolato e pelas AgNPs, mas o $AgNO_3$ produziu um estímulo de comprimento sob o mesmo arranjo volumétrico. Portanto, a resposta não sustenta uma hierarquia fixa entre as preparações.

3.3 Massa fresca em folhas destacadas

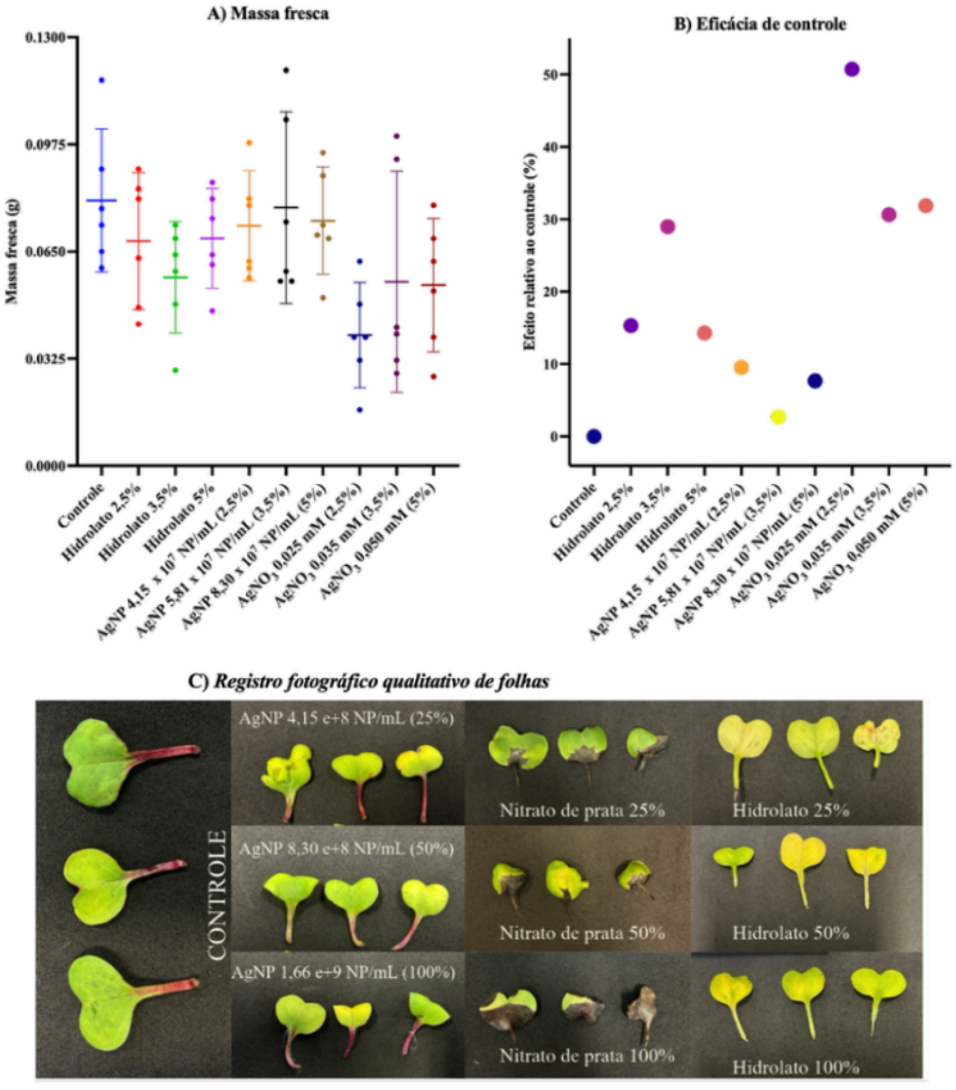
No ensaio com folhas destacadas (Figura 3), a massa fresca variou entre os dez grupos. A ANOVA clássica apresentou $F(9,50) = 2,36$ e $p = 0,0259$. Como o teste de Brown–Forsythe não indicou heterogeneidade ($F(9,50) = 0,58$; $p = 0,806$), a ANOVA clássica foi mantida como referência global. A massa média do controle foi de 0,0805 g.

As médias das AgNPs foram de 0,0682 g, 0,0572 g e 0,0690 g nas proporções de 100%, 50% e 25%, respectivamente. Esses valores corresponderam a reduções descritivas de 15,3%, 29,0% e 14,3%. O hidrolato produziu 0,0728 g, 0,0783 g e 0,0743 g, com reduções de

9,5%, 2,7% e 7,7%, respectivamente. O $AgNO_3$ produziu 0,0397 g, 0,0558 g e 0,0548 g, com reduções de 50,7%, 30,6% e 31,9%, respectivamente. Após o ajuste de Holm, apenas $AgNO_3$ 100% permaneceu diferente do controle, com diferença de -0,0408 g e p ajustado de 0,0318.

A eficácia de controle (Figura 3B), calculada a partir das médias, foi apresentada como métrica descritiva. Os valores foram de 15,3%, 29,0% e 14,3% para AgNPs; 9,5%, 2,7% e 7,7% para hidrolato; e 50,7%, 30,6% e 31,9% para $AgNO_3$. Como a eficácia é derivada da média do controle e não constitui uma observação independente, não foi utilizada como teste estatístico adicional.

Figura 3. *Massa fresca e eficácia de controle descritiva em folhas destacadas de rabanete. Cada ponto representa uma folha individual. As barras representam IC95%.*



Esse resultado não favorece a hipótese de que as AgNPs sejam a preparação mais eficiente para reduzir a massa fresca do rabanete. O maior efeito relativo foi observado com

$AgNO_3$ a 100% (Figura 3C). Estudos comparativos em outras espécies também observaram respostas mais intensas ao $AgNO_3$ em alguns sistemas, embora as AgNPs possam apresentar efeitos próprios relacionados ao tamanho, ao recobrimento e à dissolução (Vishwakarma et al., 2017; Iannelli et al., 2022; Zareei et al., 2024).

3.4 Pulverização pós-emergência

Para o comprimento radicular (Tabela 3), o teste de Brown-Forsythe não indicou heterogeneidade de variâncias, $F(9, 70) = 1,84$, $p = 0,076$. A ANOVA de uma via indicou diferença entre os grupos, $F(9, 70) = 4,39$, $p < 0,001$.

Nas comparações de Welch com o controle, com ajuste de Holm, a AgNP a 25% apresentou comprimento superior ao controle, com diferença de 1,74 cm e $p = 0,0412$ após o ajuste. A $AgNO_3$ a 50% apresentou comprimento inferior ao controle, com diferença de 1,61 cm e $p = 0,0110$ após o ajuste. A $AgNO_3$ a 25% também apresentou comprimento inferior ao controle, com diferença de 1,83 cm e $p = 0,0011$ após o ajuste. Os demais contrastes não permaneceram estatisticamente significativos após o ajuste. Assim, a resposta radicular não apresentou redução uniforme à medida que a proporção de cada preparação aumentava.

O comprimento da parte aérea também diferiu entre os grupos. O teste de Brown-Forsythe não detectou heterogeneidade de variâncias, $F(9, 70) = 1,16$, $p = 0,332$; por isso, a ANOVA de uma via foi utilizada como teste global, $F(9, 70) = 6,60$, $p < 0,001$ (Tabela 3). Nas comparações de Welch contra o controle, com ajuste de Holm, AgNP 50% apresentou comprimento da parte aérea menor que o controle, com diferença de 1,46 cm e $p = 0,0184$ após ajuste de Holm. Nenhum dos outros contrastes permaneceu significativo após o ajuste.

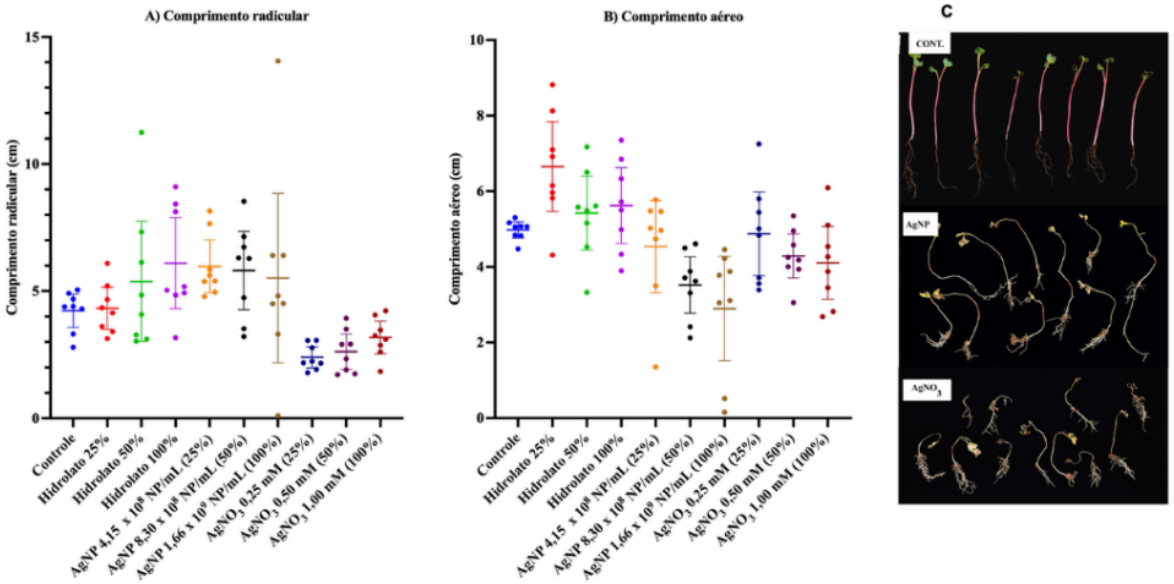
Tabela 3 – Resultados dos testes de pulverização pós-emergência.

Grupo	n	Raiz média ± DP (cm)	IC95% raiz	Parte aérea média ± DP (cm)	IC95% aérea
Controle	8	4,23 ± 0,78	3,58-4,89	4,98 ± 0,26	4,76-5,19
AgNP 100%	8	5,51 ± 3,98	2,18-8,84	2,90 ± 1,65	1,51-4,28
AgNP 50%	8	5,81 ± 1,84	4,27-7,35	3,52 ± 0,89	2,78-4,26
AgNP 25%	8	5,97 ± 1,24	4,93-7,01	4,54 ± 1,46	3,32-5,76
$AgNO_3$ 100%	8	3,18 ± 0,77	2,53-3,82	4,10 ± 1,15	3,14-5,07
$AgNO_3$ 50%	8	2,62 ± 0,83	1,93-3,32	4,29 ± 0,70	3,71-4,87
$AgNO_3$ 25%	8	2,40 ± 0,50	1,98-2,82	4,87 ± 1,32	3,77-5,98
Hidrol. 100%	8	6,10 ± 2,14	4,31-7,89	5,62 ± 1,20	4,62-6,62
Hidrol. 50%	8	5,38 ± 2,82	3,02-7,74	5,42 ± 1,17	4,44–6,40
Hidrol. 25%	8	4,33 ± 0,99	3,50-5,15	6,65 ± 1,42	5,47-7,83

Considerados em conjunto, os dois resultados indicam respostas dependentes da formulação e do órgão avaliado, sem supressão consistente atribuível a uma única preparação.

AgNP 25% esteve associada a um maior comprimento radicular, enquanto AgNP 50% apresentou menor comprimento da parte aérea; $AgNO_3$ 25% e 50% reduziram o comprimento radicular em relação ao controle (Figura 4). A pulverização também deve ser considerada uma via de exposição própria, pois a deposição, a retenção foliar, as propriedades da superfície e a transformação da prata podem influenciar a resposta vegetal (Wu et al., 2020; Avellan et al., 2021; Pinna; Husted, 2025; Yang et al., 2019).

Figura 4. Comprimento da raiz (A) e da parte aérea (B) após pulverização pós-emergência (C) imagem dos tratamentos com AgNP e $AgNO_3$. Cada ponto representa uma planta. As barras representam IC95%.



Neste ensaio de curta duração (Figura 4), os comprimentos mensurados não permitem inferir a mortalidade nem a eficácia como bioherbicida em condições agronômicas. Entretanto, observa-se uma diferença visual acentuada entre o controle e as plântulas tratadas (Figura 4C). Nessa figura, são apresentadas plântulas do grupo controle e plântulas tratadas com AgNP e $AgNO_3$, as que não apresentam crescimento vigoroso, sugerindo que provavelmente morreriam se submetidas a um ensaio de maior duração.

3.5 O que os resultados permitem afirmar sobre a triagem bioherbicida

A pergunta deste trabalho foi se as AgNPs biogênicas suprimiriam o crescimento do rabanete. O conjunto de dados analisados não permite afirmar que os tratamentos com nanopartículas reduziram o comprimento radicular condicional, a emergência e o índice de germinação em diferentes combinações. No ensaio com folhas destacadas, o $AgNO_3$ a 100% produziu o maior efeito de redução de massa. Nos testes de pulverização, AgNP a 25% aumentou o comprimento radicular, enquanto $AgNO_3$ a 25% e a 50% reduziram, indicando que a dose pode ser um fator crucial na aplicação de nanopartículas visando ao controle de plantas daninhas. Porém, é importante destacar que, embora plantas tratadas com AgNP tenham apresentado crescimento compatível com o controle, é nítido que não apresentaram viço; a coloração foi afetada, o que sugere uma possível quebra no processo de fotossíntese e a necessidade de investigação adicional.

A literatura sobre nanoherbicidas reforça que resultados em placa, folha destacada ou vaso devem ser tratados como triagem ou como avaliação controlada, sendo necessários ensaios de campo com cultura, comunidade de plantas daninhas, controles convencionais, produtividade, acompanhamento temporal, destino ambiental e organismos não-alvo (Kookana et al., 2014; La Iacona et al., 2025; Chen et al., 2025). Alguns estudos, como o de Jiang et al. (2023) que utilizaram AgNPs contra plantas daninhas em placas, também demonstram fitotoxicidade em condições específicas, mas não estabelecem seletividade, persistência ou desempenho em campo (Jiang et al., 2023).

4 Conclusão

As respostas das preparações com prata variaram conforme a formulação, a concentração e a via de exposição. No pré-tratamento de sementes, AgNPs biogênicas

reduziram o comprimento radicular condicional e o índice de germinação, enquanto $AgNO_3$ os aumentou. Em folhas destacadas, $AgNO_3$ a 100% causou a maior redução de massa fresca. Na pulverização, AgNP, embora tenha mostrado aumento do comprimento, apresentou condições de estresse nas plantas, sugerindo possível morte futura da plântula. Assim, as AgNPs biogênicas não superaram, globalmente, o $AgNO_3$ ou o hidrolato na supressão de *R. sativus*. O estudo fornece uma triagem controlada de fitotoxicidade e de crescimento, mas não comprova a eficácia bioherbicida agronômica, a seletividade, a persistência ambiental ou o mecanismo de ação.

Referências

ALMEIDA, H. H. S. et al. Unlocking the Potential of Hydrosols: Transforming Essential Oil Byproducts into Valuable Resources. *Molecules*, v. 29, n. 19, art. 4660, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules29194660. Acesso em: 7 nov. 2026.

AVELLAN, A. et al. Critical Review: Role of Inorganic Nanoparticle Properties on Their Foliar Uptake and in Planta Translocation. *Environmental Science & Technology*, v. 55, n. 20, p. 13417–13431, 2021. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00178. Acesso em: 7 nov. 2026.

BALUSAMY, S. R. et al. Advancing sustainable agriculture: a critical review of smart and eco-friendly nanomaterial applications. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 21, n. 1, art. 372, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s12951-023-02135-3. Acesso em: 7 nov. 2026.

BHATTACHARJEE, S. DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, v. 235, p. 337–351, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017. Acesso em: 7 nov. 2026.

BUDHANI, S. et al. Phytotoxic effect of silver nanoparticles on seed germination and growth of terrestrial plants. *Journal of Environmental Science and Health, Part C: Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews*, v. 37, n. 4, p. 330–355, 2019. DOI: https://doi.org/10.1080/10590501.2019.1676600. Acesso em: 7 nov. 2026.

CAMPOS, E. V. R. et al. Nature-Based Herbicides and Micro-/Nanotechnology Fostering Sustainable Agriculture. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 11, n. 27, p. 9900–9917, 2023. DOI: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c02282. Acesso em: 7 nov. 2026.

CASCIO, P. et al. Critical Experimental Evaluation of Key Methods to Detect, Size and Quantify Nanoparticulate Silver. *Analytical Chemistry*, v. 86, n. 24, p. 12143–12151, 2014. DOI: https://doi.org/10.1021/ac503307r. Acesso em: 7 nov. 2026.

CHEN, Y. et al. Nanoherbicides for Efficient, Safe, and Sustainable Weed Management: A Review. *Nanomaterials*, v. 15, n. 17, art. 1304, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/nano15171304. Acesso em: 7 nov. 2026.

FILIPE, V.; HAWE, A.; JISKOOT, W. Critical Evaluation of Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) by NanoSight for the Measurement of Nanoparticles and Protein Aggregates. *Pharmaceutical Research*, v. 27, n. 5, p. 796–810, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/s11095-010-0073-2. Acesso em: 7 nov. 2026.

GUILGER, M. et al. Biogenic silver nanoparticles based on Trichoderma harzianum: synthesis, characterization, toxicity evaluation and biological activity. *Scientific Reports*, v. 7, art. 44421, 2017. DOI: https://doi.org/10.1038/srep44421. Acesso em: 7 nov. 2026.

IANNELLI, M. A. et al. Differential phytotoxic effect of silver nitrate (AgNO3) and bifunctionalized silver nanoparticles (AgNPs-Cit-L-Cys) on Lemna plants (duckweeds). *Aquatic Toxicology*, v. 250, art. 106260, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106260. Acesso em: 7 nov. 2026.

JIANG, X. et al. Characterization of Silver Nanoparticles Synthesized by the Aqueous Extract of Zanthoxylum nitidum and Its Herbicidal Activity against Bidens pilosa L. *Nanomaterials*, v. 13, n. 10, art. 1637, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/nano13101637. Acesso em: 7 nov. 2026.

KIM, J. et al. Validation of Size Estimation of Nanoparticle Tracking Analysis on Polydisperse Macromolecule Assembly. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, art. 2639, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-38915-x. Acesso em: 7 nov. 2026.

KOLEY, R.; MONDAL, A.; MONDAL, N. K. Green synthesized silver nanoparticles mediated regulation on hydrolytic enzymes and ROS homeostasis promote growth of three pulses (Cicer arietinum L., Pisum sativum L., and Vigna radiata L.). *Energy, Ecology and Environment*, v. 8, n. 6, p. 537–555, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s40974-023-00293-6. Acesso em: 7 nov. 2026.

KOOKANA, R. S. et al. Nanopesticides: Guiding Principles for Regulatory Evaluation of Environmental Risks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 62, n. 19, p. 4227–4240, 2014. DOI: https://doi.org/10.1021/jf500232f. Acesso em: 7 nov. 2026.

LA IACONA, M. et al. The Exploitation of Nanotechnology in Herbicides and Bioherbicides: A Novel Approach for Sustainable Weed Management. *Agronomy*, v. 15, n. 1, art. 228, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy15010228. Acesso em: 7 nov. 2026.

LEGEÉ ÓLEOS ESSENCIAIS E COMPOSTOS LTDA. Hidrolato de Eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) orgânico não certificado - 5L. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://legee.com.br/products/hidrolato-de-eucalipto-eucalyptus-citriodora-organico-nao-certificado-5l-747218480. Acesso em: 7 nov. 2026.

LIU, H. et al. Phytotoxicological effects of phytosynthesized nanoparticles: a systematic review and meta-analysis. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 54, n. 17, p. 1237–1257, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2303299. Acesso em: 7 nov. 2026.

MATRAS, E. et al. Phytotoxicity of Silver Nanoparticles with Different Surface Properties on Monocots and Dicots Model Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 22, n. 2, p. 1647–1664, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s42729-022-00760-9. Acesso em: 7 nov. 2026.

PEHAREC ŠTEFANIĆ, P. P. et al. Phytotoxicity of silver nanoparticles on tobacco plants: evaluation of coating effects on photosynthetic performance and chloroplast ultrastructure. *Nanomaterials*, v. 11, n. 3, art. 744, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/nano11030744. Acesso em: 7 nov. 2026.

PINNA, A.; HUSTED, S. Translocation of Foliar-Applied Nanoparticles: A Critical Review From a Plant Science Perspective. *Physiologia Plantarum*, v. 177, n. 5, e70476, 2025. DOI: https://doi.org/10.1111/ppl.70476. Acesso em: 7 nov. 2026.

TRIPATHI, A. et al. Interaction of silver nanoparticles with plants: A focus on the phytotoxicity, underlying mechanism, and alleviation strategies. *Plant Nano Biology*, v. 9, art. 100082, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100082. Acesso em: 7 nov. 2026.

TYMOSZUK, A. Silver Nanoparticles Effects on In Vitro Germination, Growth, and Biochemical Activity of Tomato, Radish, and Kale Seedlings. *Materials*, v. 14, n. 18, art. 5340, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14185340. Acesso em: 7 nov. 2026.

VANNINI, C. et al. Morphological and Proteomic Responses of Eruca sativa Exposed to Silver Nanoparticles or Silver Nitrate. *PLOS ONE*, v. 8, n. 7, e68752, 2013. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068752. Acesso em: 7 nov. 2026.

VISHWAKARMA, K. et al. Differential Phytotoxic Impact of Plant Mediated Silver Nanoparticles (AgNPs) and Silver Nitrate (AgNO3) on Brassica sp. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, art. 1501, 2017. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01501. Acesso em: 7 nov. 2026.

WU, J. et al. Foliar versus root exposure of AgNPs to lettuce: Phytotoxicity, antioxidant responses and internal translocation. *Environmental Pollution*, v. 261, art. 114117, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114117. Acesso em: 7 nov. 2026.

YANG, Q. et al. Uptake and Transformation of Silver Nanoparticles and Ions by Rice Plants Revealed by Dual Stable Isotope Tracing. *Environmental Science & Technology*, v. 53, n. 2, p. 625–633, 2019. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02471. Acesso em: 7 nov. 2026.

YIN, L. et al. More than the ions: the effects of silver nanoparticles on Lolium multiflorum. *Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 6, p. 2360–2367, 2011. DOI: https://doi.org/10.1021/es103995x. Acesso em: 7 nov. 2026.

ZAREEI, M. et al. Physiological and molecular responses of basil (Ocimum basilicum) to silver stress: a comparison between silver nanoparticles and silver nitrate treatments. *Biologia*, v. 79, n. 6, p. 1611–1621, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s11756-024-01627-3. Acesso em: 7 nov. 2026.

ZHANG, F. J. et al. Phytotoxic Activity and Chemical Composition of Aqueous Volatile Fractions from Eucalyptus Species. *PLOS ONE*, v. 9, n. 3, e93189, 2014. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093189. Acesso em: 7 nov. 2026.

ZIOTTI, L. S. et al. Differential physiological responses of a biogenic silver nanoparticle and its production matrix silver nitrate in Sorghum bicolor. *Environmental Science and*

Pollution Research, v. 28, n. 25, p. 32669–32682, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-021-13069-4. Acesso em: 7 nov. 2026.

ZUVERZA-MENA, N. et al. Effects of Silver Nanoparticles on Radish Sprouts: Root Growth Reduction and Modifications in the Nutritional Value. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, art. 90, 2016. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00090. Acesso em: 7 nov. 2026.