
CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

CAIO VINÍCIUS MENELE SEVERINO

**Efeito do óxido nítrico encapsulado na
germinação e no crescimento radicular de
Tabebuia impetiginosa sob déficit hídrico**



Rio Claro - SP
2025

CAIO VINÍCIUS MENELE SEVERINO

Efeito do óxido nítrico encapsulado na germinação e no crescimento radicular de
Tabebuia impetiginosa sob déficit hídrico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”, para obtenção do grau de Licenciado e
Bacharel em Ciências Biológicas

Orientadora: Neidiquele Maria Silveira

Rio Claro - SP
2025

S498e

Severino, Caio Vinícius Menele

Efeito do óxido nítrico encapsulado na germinação e no crescimento radicular de *Tabebuia impetiginosa* sob déficit hídrico / Caio Vinícius Menele Severino. -- Rio Claro, 2025

25 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado e licenciatura - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro

Orientadora: Neidiquele Maria Silveira

1. Mudanças Climáticas. 2. Restauração Florestal. 3. S-nitrosoglutatona. 4. Desenvolvimento inicial. 5. Seca. I. Título.

CAIO VINÍCIUS MENELE SEVERINO

Efeito do óxido nítrico encapsulado na germinação e no crescimento
radicular de *Tabebuia impetiginosa* sob déficit hídrico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”, para obtenção do grau de Licenciado e
Bacharel em Ciências Biológicas.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Neidiquele Maria Silveira

Prof. Dr. Gustavo Habermann

Dra. Luá Taibo Timpone

Aprovado em: 07 de novembro de 2025

Assinatura do discente

Assinatura da orientadora

*Dedico esse trabalho aos meus avós: Nair Ignácio Menele,
Vanderlei José Alves Menele e Nair Miralha Leiva por sempre
me mostrarem que a vida pode ser colorida quando estamos
com quem amamos.*

AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento desse trabalho e ao longo de toda minha trajetória em minha graduação tive ajuda de muitas pessoas e instituições. Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus pais, Marcos e Débora, por serem minha base e refúgio durante todos esses anos e a minha irmã Giovanna, pela parceria.

Além disso, agradeço ao restante da minha família que foi importante em cada momento da minha formação, meus avôs, Vanderlei e Batista, avós, Nair Menele e Nair Miralha, aos meus tios e primos.

Aos meus amigos Ana, André, Catharina, Gabriel, João, Lívia, Luíza, Maria, Tito e Victor pelas risadas, conversas, choros e por se tornarem minha família na universidade, minha graduação não seria tão mágica quanto foi sem vocês.

À minha orientadora Professora Neidiquele, por sempre acreditar em mim e oferecer oportunidades únicas em minha vida.

Aos integrantes do laboratório de Fisiologia Vegetal, Fernando, Sabrina, Jaqueline, Vitória, Sofia e Eduardo pelo companheirismo.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista (UNESP) e, em particular, à Pró-Reitoria de Pesquisa (PROPe) e à Reitoria da UNESP pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC), proposta 14110.

Ao Instituto de Biociências, ao Departamento de Biodiversidade e ao CEPID Processo n°2021/10639-5, ao qual esse projeto está vinculado, por possibilitarem a pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo n°2024/14272-7 . As presentes opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

RESUMO

Este estudo avaliou o potencial da S-nitrosoglutationa (GSNO), um doador de óxido nítrico (NO), para atenuar os efeitos do déficit hídrico sobre a germinação e o crescimento inicial de sementes de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa*), espécie nativa de grande relevância para programas de restauração florestal. Foram realizados testes para determinar o método mais adequado de germinação (rolos de papel ou gerbox) e a concentração ideal de polietilenoglicol (PEG-8000) para simular déficit hídrico. Em seguida, iniciou-se o experimento onde as sementes foram submetidas a seis tratamentos: controle, em que foram embebidas em água e germinadas em papel filtro umedecido com água; déficit hídrico (DH), simulado com sementes embebidas em água e germinadas em papel umedecido com polietileno glicol (PEG-8000); e sementes tratadas com GSNO encapsulado nas concentrações de 100, 500, 1000 e 2000 μM , todas também submetidas às condições de DH. O PEG foi utilizado na concentração equivalente a um potencial osmótico de $-0,175\text{ MPa}$. Nossos resultados indicam que os parâmetros de germinação não foram afetados, independentemente da hidratação e dos tratamentos das sementes. Quanto ao comprimento radicular, as sementes sob DH apresentaram menor crescimento, enquanto o tratamento com GSNO a 1000 μM resultou no maior crescimento radicular, mesmo sob condições restritivas. Estudos futuros devem avaliar outros doadores de NO e também testar sementes coletadas diretamente do campo, sem longo período de armazenamento.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Restauração florestal; S-nitrosoglutationa; Desenvolvimento inicial; Seca.

ABSTRACT

This study evaluated the potential of S-nitrosoglutathione (GSNO), a nitric oxide (NO) donor, to mitigate the effects of water deficit on the germination and initial growth of seeds of *Tabebuia impetiginosa* (purple ipê), a native species of great relevance for forest restoration programs. Tests were conducted to determine the most suitable germination method (paper rolls or gerbox) and the ideal concentration of polyethylene glycol (PEG-8000) to simulate water deficit. Subsequently, the experiment was initiated, subjecting the seeds to six treatments: a control, in which seeds were soaked in water and germinated on filter paper moistened with water; a water deficit (WD) treatment, simulated by soaking seeds in water and germinating them on paper moistened with polyethylene glycol (PEG-8000); and treatments with encapsulated GSNO at concentrations of 100, 500, 1000, and 2000 μM , all of which were also subjected to WD conditions. PEG was used at a concentration equivalent to an osmotic potential of -0.175 MPa. Our results indicate that germination parameters were unaffected, regardless of hydration and seed treatments. Regarding root length, seeds under WD exhibited the least growth, whereas the treatment with 1000 μM GSNO resulted in the greatest root growth, even under restrictive conditions. Future studies should evaluate other NO donors and test seeds collected directly from the field, without long-term storage.

Keywords: Climate change; Forest restoration; S-nitrosoglutathione; Initial development; Drought.

Title in english: Effect of Encapsulated Nitric Oxide on Germination and Root Growth of *Tabebuia impetiginosa* under Water Deficit

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVO.....	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1 Testes para definição do método de germinação e da concentração de PEG....	13
3.2 Síntese de nanopartículas de quitosana com doador de NO.....	13
3.3 Estratégia experimental: comparando as concentrações de GSNO encapsulado..	13
3.4 Métodos.....	14
4 RESULTADOS.....	16
4.1 Determinação do método de germinação e da concentração de PEG.....	16
4.2 Definição da concentração de GSNO encapsulado.....	17
5 DISCUSSÃO.....	19
5.1 Análise dos Resultados de Germinação.....	19
5.2 Efeitos do GSNO no crescimento radicular.....	19
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	21
REFERÊNCIAS.....	22

1 INTRODUÇÃO

As previsões climáticas para este século apontam para uma maior variabilidade nas precipitações, com períodos de seca tornando-se mais frequentes, conforme destacado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023). Essas mudanças terão impactos significativos na biodiversidade florestal, afetando os ecossistemas, os padrões fotossintéticos e os ciclos hidrológicos e de carbono em ambientes terrestres e marinhos. Diante desse contexto, a restauração florestal com espécies nativas emerge como uma estratégia crucial nos dias de hoje. Especialmente quando as florestas perdem a capacidade de se regenerar naturalmente, seja devido a distúrbios ambientais em larga escala, conforme observado por Brancalion et al. (2015).

Apesar da restauração florestal ser considerada uma importante estratégia, seu sucesso é dificultado pela baixa germinabilidade após o plantio, problema amplificado por eventos de seca. É comum essas áreas degradadas apresentarem condições ambientais estressantes como deficiência hídrica, o que irá interferir negativamente na germinação e estabelecimento dessas espécies. Assim, estratégias para melhorar o vigor das sementes, aumentando sua viabilidade e capacidade de germinação em condições adversas, são, portanto, essenciais para aumentar o sucesso da restauração florestal (Nolan et al., 2018).

O déficit hídrico é o principal fator ambiental que influencia negativamente a germinação, o desenvolvimento e a sobrevivência das mudas (Axelsson et al., 2020). Alguns estudos têm mostrado que as sementes podem tolerar melhor os estresses abióticos através do chamado 'priming' de sementes. O pré-tratamento das sementes pode trazer benefícios como emergência rápida e uniforme, alto vigor e rendimento, um desses tratamentos utilizados é a aplicação de doadores de óxido nítrico (Kaur et al., 2005). O NO, segundo Silveira et al. (2020), induz a germinação em sementes de feijão comum sob déficit hídrico em parâmetros como velocidade e porcentagem de germinação. Além disso, alguns estudos têm demonstrado que o tratamento com doadores de NO, em condições de déficit hídrico, aumentou significativamente a biomassa das raízes com conseqüente incremento na área de absorção de água, o que permitiu que as plantas mantivessem seu status hídrico sob tais condições (Silveira et al., 2016, 2017a). O NO foi nomeado como um

intermediário na cascata de sinalização regulada pela auxina, influenciando a morfologia e fisiologia das raízes (Correa-Aragunde et al., 2004). Além disso, tem sido relatado que o NO favorece a quebra de dormência de sementes de espécies florestais (Ataide et al., 2015).

Uma espécie florestal muito usada em áreas de restauração é a *Tabebuia impetiginosa*, que apesar de estar presente em diversos ambientes que passam naturalmente por secas, como o Cerrado e a Caatinga (Almeida et al, 2024), a falta de água durante sua germinação é um fator que impacta negativamente em sua germinação e desenvolvimento inicial, como pode ser evidenciado no estudo de Martins et al (2015) argumentando sobre a germinação dessa planta ser rápida e sem dormência, o que possibilita um maior efeito da seca nessas sementes, gerando radícula necróticas, aumentando a taxa de mortalidade das plântulas geradas. Além disso, Valdovinos et al (2021) compara três espécies de Bignoniaceae sobre efeito de déficit hídrico durante a germinação e desenvolvimento inicial, sendo elas *T. roseoalba*, *H. chrysotrichus*, e *T. impetiginosa*, resultando num efeito negativo mais significativo em *Tabebuia impetiginosa*. Ademais, ainda não há estudos da relação do óxido nítrico e seca em *T. impetiginosa*, o que justifica a importância do estudo.

Existem vários doadores de NO que diferem na composição, meia-vida, taxa de liberação de NO sob condições de luz e presença de agentes redutores (Seabra et al., 2022). Uma importante classe de doadores de NO são os S-nitrosotióis (RSNOs), como a S-nitrosoglutationa (GSNO), no entanto, esse doador apresenta baixo peso molecular e são fotoquimicamente e termicamente instáveis (Shishido et al., 2003). Neste sentido, o aprisionamento destes doadores de NO em nanomateriais têm surgido como uma estratégia que pode proteger essas moléculas da rápida degradação, permitindo uma liberação mais controlada do NO, prolongando seu efeito (Seabra et al., 2015).

Uma das estratégias de encapsulamento é incorporar o ativo em matrizes poliméricas, como as nanopartículas à base de quitosana. A quitosana, um polissacarídeo biodegradável e biocompatível, destaca-se como uma das matrizes mais utilizadas em aplicações de liberação de fármacos, especialmente como um sistema nanocarreador (Pelegriño et al., 2017). Alguns estudos como o realizado em sementes de tomate tratadas com SNP (nitroprussiato de sódio) tiveram índice de germinação melhorado, crescimento de plântulas, teor de açúcar e atividades α e

β -amilase sob estresse de baixa temperatura, que foram associados com alto nível de NO nas sementes (Amooaghaie and Nikzad, 2013). Assim, o nanocondicionamento de sementes pode beneficiar diversas fases do ciclo da planta, como germinação, armazenamento, estabelecimento de plântulas e produção de frutos (Pereira et al., 2021). Apesar dos estudos com NO e nanopartículas estarem na sua infância, vislumbra-se que a nanotecnologia possa representar um avanço na ciência ambiental.

Foram utilizadas sementes da espécie florestal *Tabebuia impetiginosa*, de sinonímia *Handroanthus impetiginosus* conhecida popularmente como ipê-roxo-de-bola, pau-d'arco-roxo. A *T. impetiginosa* é uma espécie arbórea pertencente à família Bignoniaceae, sendo nativa do nordeste ao sudeste brasileiro e explorada intensamente nas regiões de ocorrência, sobretudo pela indústria moveleira, paisagística e farmacêutica (Lima et al, 2014; Lorenzi, 1998). Segundo Viana (2017), as árvores de *T. impetiginosa* possuem altura de 8 a 20 metros, podendo alcançar até 35 metros. Apresentam folhas compostas, digitadas com cinco folíolos elípticos, tendo até 20 cm de comprimento e 11 cm de largura, com os folíolos terminais maiores e margens inteiras.

A floração das árvores ocorre de maio a julho, sua polinização é feita por mamangavas e arapuás, frutificando entre junho e setembro, com frutos pretos quando maduros. Produz grandes quantidades de sementes com curto período de viabilidade dependendo das condições naturais em que se encontram as matrizes. (Carvalho, 1994; Silva Júnior e Lima, 2010; Corrêa et al., 2008). Os frutos de *T. impetiginosa* são secos, em forma de vagens, com sementes anemocóricas. Apesar de apresentar sementes que têm comportamento ortodoxo e serem aladas com membranas laterais que lhe proporcionam certa leveza e facilita a dispersão, a sua propagação é restringida muitas vezes pela baixa viabilidade das sementes, sendo necessários estudos nutricionais para a espécie, de modo a evitar sua extinção em decorrência da exploração predatória (Viana, 2017; Da Silva et al., 2021).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial da aplicação exógena de S-nitrosoglutatioma (GSNO) encapsulado — um doador de óxido nítrico (NO) — como indutor de vigor em sementes nativas de interesse para restauração florestal sob condições de déficit hídrico. A hipótese a ser testada é que sementes tratadas com GSNO encapsulado apresentam maior germinação e crescimento radicular da *Tabebuia impetiginosa* sob déficit hídrico, de forma dose-dependente.

2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar o melhor método de germinação da *T. impetiginosa* e definir a concentração adequada de polietileno glicol (PEG-8000) a ser utilizada para simular condições de déficit hídrico.
- b) Avaliar os parâmetros de germinação da *T. impetiginosa* a partir de sementes tratadas com diferentes concentrações de GSNO encapsulado sob déficit hídrico.
- c) Avaliar o desenvolvimento radicular das plântulas provenientes de sementes tratadas com GSNO, considerando as diferentes concentrações aplicadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Testes para definição do método de germinação e da concentração de PEG

As sementes foram esterilizadas na superfície com hipoclorito de sódio a 10% (v/v) durante 20 minutos e depois enxaguadas seis vezes com água destilada estéril. Em seguida, um teste para verificar o melhor método para germinação foi realizado, comparado às sementes dispostas em papel filtro (tipo Germitest®) ou caixas do tipo gerbox. Um outro teste foi realizado para decidir a melhor concentração de polietilenoglicol (PEG-8000) para os tratamentos sob déficit hídrico. Para tal, as sementes foram dispostas em papel filtro umedecido em duas concentrações distintas de polietilenoglicol (PEG-8000), uma com potencial osmótico de -0,302 MPa e a outra de -0,175 MPa.

3.2 Síntese de nanopartículas de quitosana com doador de NO

As nanopartículas de quitosana foram obtidas pelo método de gelificação ionotrópica, conforme descrito anteriormente (Silveira et al., 2019b). Resumidamente, a quitosana foi dissolvida em ácido acético (1%) e 1,3 mmol L⁻¹ de GSH. Após 90 min de agitação magnética à temperatura ambiente, uma solução de tripolifosfato de sódio (TPP) a 0,6 mg mL⁻¹ foi adicionada gota a gota à solução. Para a mistura final agitou-se magneticamente por 90 min. A concentração final de GSH permaneceu igual a 1,0 mmol L⁻¹. Para obter nanopartículas de quitosana contendo GSNO, uma quantidade equimolar de nitrito de sódio foi adicionada à dispersão, e a solução final homogeneizada. A reação permaneceu por 90 min no escuro, e após sua preparação, utilizou-se a solução imediatamente.

3.3 Estratégia experimental: comparando as concentrações de GSNO encapsulado

As sementes foram esterilizadas conforme descrito anteriormente. Em seguida as sementes foram tratadas com as concentrações de 100, 500, 1000 e 2000 µM de GSNO encapsulado. Para o tratamento controle, as sementes foram tratadas água, o qual foram embebidas por 12 horas, em seguida foram dispostas em papel filtro (tipo Germitest®), umedecido com água na proporção de 2,5 vezes o

peso do papel. Para o tratamento de déficit hídrico (DH), as sementes também foram tratadas com água (12 horas), mas germinaram em papel umedecido com PEG-8000. O déficit hídrico também foi simulado para as concentrações de GSNO, ou seja, papel umedecido com PEG-8000 na proporção de 2,5 vezes o peso do papel, em concentração que equivale ao potencial osmótico de -0,175 MPa, decidido no ensaio anterior.

Para cada tratamento foram utilizadas 4 repetições de 20 sementes. Os rolos foram mantidos em câmara de germinação (BOD) na temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ em um fotoperíodo de 12 horas, com luz fluorescente em uma densidade de fluxo de fótons de $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por 22 dias (Viana, 2017). Os efeitos de cada tratamento foram avaliados ao final do experimento (22 dias) sobre a taxa de germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), o comprimento radicular e a massa seca de parte aérea e radicular.

3.4 Métodos

1) Germinação: Diariamente foi feita a contagem das sementes germinadas. A germinação (G) foi calculada pela fórmula $G = (N/20) \times 100 [\%]$, em que: N = número de sementes germinadas nos dias de contagem (Brasil, 2009).

2) Índice de Velocidade de Germinação (IVG): o IVG foi calculado por meio da fórmula $IVG = \sum (N / t)$, em que: N = número de sementes que germinaram em cada contagem; t = número de dias da semeadura (Brasil, 2009).

3) Comprimento radicular: ao final do experimento as raízes foram medidas utilizando um paquímetro.

4) Massa seca de parte aérea e radicular: ao final do experimento, folhas e raízes foram coletadas e colocadas em sacos de papel Kraft separadamente e levadas para estufa de circulação forçada a 60°C , até peso constante, para mensuração de massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey quando foi detectada significância ($p < 0,05$), considerando quatro repetições de 20 sementes por tratamento ($n = 4$). Os testes estatísticos e os gráficos foram feitos através do Software R versão 4.5.1.

4 RESULTADOS

4.1 Determinação do método de germinação e da concentração de PEG

Inicialmente, foram comparados dois métodos de germinação para sementes de *Tabebuia impetiginosa*: rolos de papel filtro (tipo Germitest®) e caixas do tipo gerbox. A germinação foi maior para o grupo de sementes distribuídas nos rolos de papel (34,2%) em comparação com as caixas gerbox (16,8%). Após a aquisição de um novo lote de sementes, obtivemos uma germinação de 56% nos rolos de papel.

Em seguida, foi realizado um teste para determinar a concentração ideal de polietilenoglicol (PEG-8000) para simular o déficit hídrico. Após 21 dias, a germinabilidade foi de:

- 63% no tratamento controle (água destilada).
- 30% para a seca leve (-0,175 MPa).
- 13,3% para seca mais severa (-0,302 MPa).

A Figura 1 ilustra a germinabilidade sob esses tratamentos. Com base nesses resultados, o potencial osmótico de -0,175 MPa foi selecionado para simular o déficit hídrico no experimento subsequente.

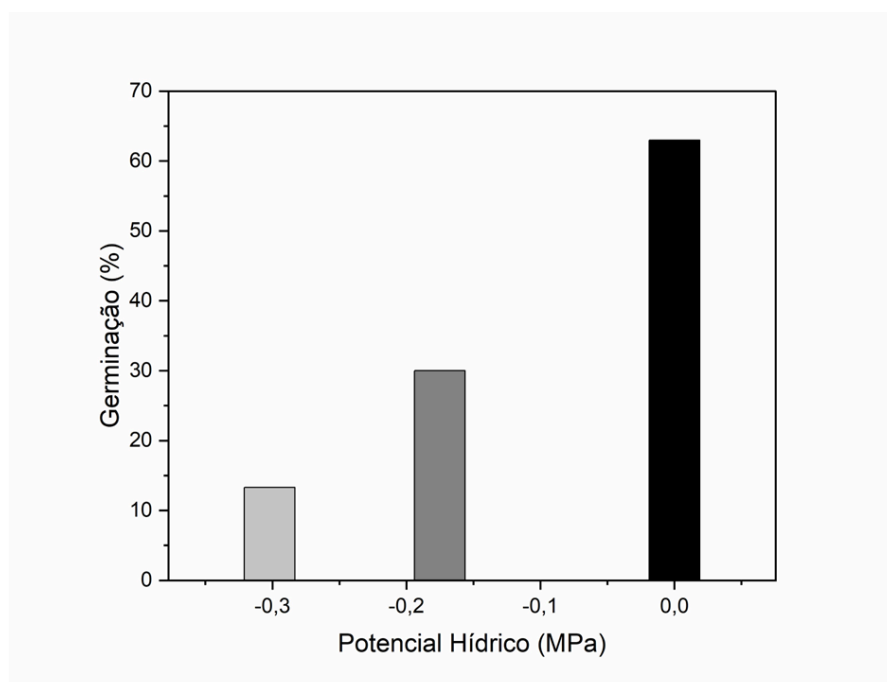


Figura 1 - Germinabilidade (%) das sementes de *T. impetiginosa* sob os tratamentos com papel filtro umedecido com polietilenoglicol (PEG-8000) nos potenciais osmóticos de -0,175 MPa e -0,302 MPa, e como controle papel filtro umedecido apenas com água.

4.2 Definição da concentração de GSNO encapsulado

De modo geral, a taxa de germinação do experimento principal foi baixa (cerca de 20%). Embora tenha sido observada uma tendência de redução na germinabilidade das sementes sob déficit hídrico e de aumento naquelas tratadas com GSNO, em comparação ao déficit hídrico isolado, as diferenças observadas não foram estatisticamente significativas para a taxa de germinação nem para o Índice de Velocidade de Germinação (IVG), conforme apresentado na Figura 2.

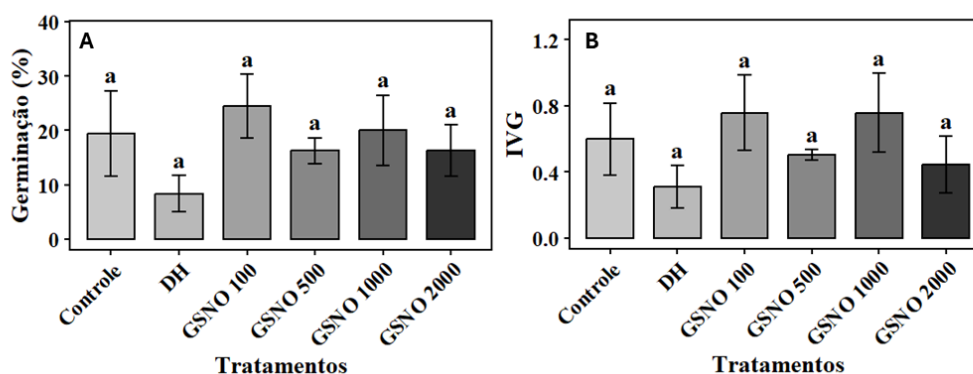


Figura 2 - Taxa de germinação (%) (em A) e índice de velocidade de germinação (IVG) (em B) das sementes de *T. impetiginosa*. Os dados representam o valor médio de quatro repetições \pm erro padrão. Cada repetição foi composta de 20 sementes. Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos (teste de Tukey, $P < 0,05$).

Em relação à massa seca da parte aérea e radicular, os resultados indicam que, nestas condições experimentais, nem o déficit hídrico nem o tratamento das

sementes com GSNO influenciaram significativamente esses parâmetros em todos os tratamentos (Figura 3A e 3B).

No entanto, em relação ao comprimento radicular (Figura 3C), as sementes submetidas ao déficit hídrico sem GSNO apresentaram o menor crescimento radicular, enquanto aquelas tratadas com 1000 μM de GSNO exibiram o maior comprimento radicular.

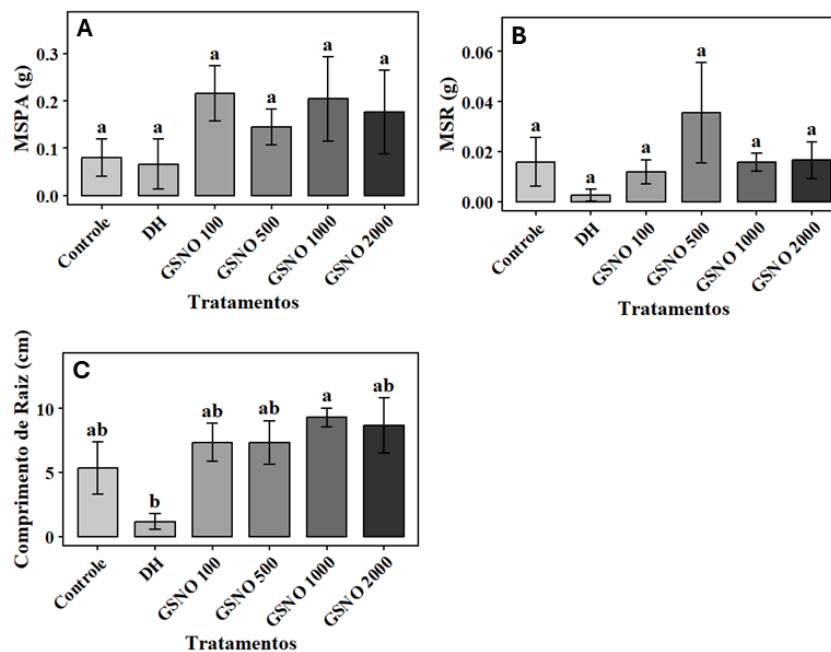


Figura 3 – Massa seca de parte aérea (MSPA) (em A), massa seca radicular (MSR) (em B) e comprimento radicular (em C). Os dados representam o valor médio de quatro repetições \pm erro padrão. Cada repetição foi composta de quatro plântulas. Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos (teste de Tukey, $P < 0,05$).

5 DISCUSSÃO

5.1 Análise dos Resultados de Germinação

A taxa de germinação do lote de sementes utilizado no experimento com GSNO foi baixa, o que pode ser possivelmente explicado pela presença de fungos e pela baixa viabilidade do lote. Segundo Botelho et al. (2008), a contaminação das sementes pode afetar severamente a qualidade fisiológica e, em alguns casos, inibir completamente a capacidade germinativa. Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas nos parâmetros de germinação (Figura 2), nota-se uma tendência de atenuação dos efeitos do déficit hídrico nas sementes tratadas com GSNO, especialmente nas concentrações de 100 μM e 1000 μM . Este resultado está em consonância com a literatura que indica que a aplicação de óxido nítrico (NO) exógeno é conhecida por melhorar a germinação em algumas espécies. O NO pode atuar tanto na quebra de dormência (Sarath et al., 2006) quanto no aumento da atividade de enzimas como a α -amilase (Beligni et al., 2002) e a β -amilase (Zhang et al., 2005), facilitando a conversão de amido em açúcares solúveis, o que foi verificado em sementes de *Triticum aestivum* sob estresse osmótico (Zhang et al., 2003).

5.2 Efeitos do GSNO no crescimento radicular

Os resultados de massa seca não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Contudo, a variação observada no comprimento radicular (Figura 3C) é um achado interessante. O fato de que sementes tratadas com 1000 μM de GSNO apresentaram o maior crescimento radicular sugere uma atuação positiva do NO no desenvolvimento inicial da plântula sob estresse hídrico.

O NO é reconhecido como uma molécula sinalizadora essencial, regulando o crescimento e desenvolvimento radicular em plantas (Silveira et al., 2020), frequentemente interagindo com a auxina e influenciando a formação de raízes adventícias (Pagnussat et al., 2002). Essa interação se dá pela modulação do NO no transporte polar da auxina, alterando a localização de proteínas transportadoras como as PIN por meio da S-nitrosilação, o que estabelece os gradientes de AIA necessários para a formação radicular. No entanto, o NO exibe uma ação bifásica: enquanto baixas doses promovem essa iniciação, às altas concentrações doadoras

de GSNO podem ser inibitórias ao alongamento e espessamento celular, processos que são cruciais para o acúmulo de massa seca radicular (Silveira et al., 2020). Assim, o aumento no comprimento radicular pode ser atribuído ao efeito sinalizador do NO liberado pelo GSNO, mesmo que este efeito não tenha se manifestado em alteração significativa na biomassa radicular. Além disso, é importante considerar que as respostas fisiológicas e morfológicas são altamente dependentes do tipo e da concentração do doador de NO (Floryszak-Wieczorek et al., 2006).

Diante desses resultados, recomenda-se a avaliação de outros doadores de NO, bem como o uso de sementes coletadas diretamente do campo, sem longo período de armazenamento, a fim de investigar possíveis variações nas respostas germinativas e de crescimento. Isso é especialmente relevante considerando que as baixas taxas de germinação observadas neste estudo podem ter mascarado qualquer efeito da aplicação das nanopartículas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um cenário de mudanças climáticas, com eventos de seca cada vez mais frequentes e baixa disponibilidade hídrica logo após a semeadura, o desenvolvimento de novas estratégias para melhorar a germinação e o estabelecimento inicial de espécies nativas de interesse para restauração de áreas degradadas torna-se fundamental para enfrentar os desafios ambientais. Nossos dados indicam que os parâmetros de germinação foram similares, independentemente da hidratação e dos tratamentos das sementes. Quanto ao comprimento radicular, as sementes sob déficit hídrico apresentaram menor crescimento, enquanto o tratamento com GSNO a 1000 μM resultou no maior crescimento radicular, mesmo sob condições restritivas.

REFERÊNCIAS

- AHANGER, Mohammad Abass et al. Influence of exogenous salicylic acid and nitric oxide on growth, photosynthesis, and ascorbate-glutathione cycle in salt stressed *Vigna angularis*. *Biomolecules*, v. 10, n. 1, p. 42, 2019.
- ALMEIDA, Romário de Sousa et al. *Handroanthus impetiginosus* biometry of seed and seedling production after different periods of immersion in water. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 59, p. e03568, 2024.
- AMOOAGHAIE, Rayhaneh; NIKZAD, Khorshid. The role of nitric oxide in priming-induced low-temperature tolerance in two genotypes of tomato. *Seed Science Research*, v. 23, n. 2, p. 123-131, 2013.
- ATAÍDE, Glauciana M. et al. Óxido nítrico na germinação de sementes de baixo vigor de *Dalbergia nigra*. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 38, n. 3, p. 438-444, 2015.
- AXELSSON, E. Petter et al. A pre-adaptive approach for tropical forest restoration during climate change using naturally occurring genetic variation in response to water limitation. *Restoration Ecology*, v. 28, n. 1, p. 156-165, 2020.
- BELIGNI, Maria Veronica et al. Nitric oxide acts as an antioxidant and delays programmed cell death in barley aleurone layers. *Plant physiology*, v. 129, n. 4, p. 1642-1650, 2002.
- BOTELHO, Luana da Silva; MORAES, Maria Heloisa Duarte; MENTEN, José Otávio Machado. Fungos associados às sementes de ipê-amarelo (*Tabebuia serratifolia*) e ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa*): incidência, efeito na germinação e transmissão para as plântulas. *Summa phytopathologica*, v. 34, p. 343-348, 2008.
- BRANCALION, P. H. S.; RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. *Restauração florestal*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 431 p.
- BRASIL, Federativa; BRASÍLIA, D. F. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Disponível em: Acesso em, v. 5, n. 10, p. 2016, 2016.
- CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho et al. *Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira*. 1994.
- CORREA-ARAGUNDE, Natalia; GRAZIANO, Magdalena; LAMATTINA, Lorenzo. Nitric oxide plays a central role in determining lateral root development in tomato. *Planta*, v. 218, n. 6, p. 900-905, 2004.
- CORRÊA, M. G. C. et al. Armazenamento de sementes de Ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* Mart.). In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília. Anais... Brasília, DF: ParlaMundi, 2008.

DO ESPIRITO SANTO PEREIRA, Anderson et al. Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, v. 11, n. 2, p. 267, 2021.

FLORYSZAK-WIECZOREK, J. et al. Do nitric oxide donors mimic endogenous NO-related response in plants?. *Planta*, v. 224, n. 6, p. 1363-1372, 2006.

IPCC. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. p. 1-34.

JÚNIOR, MANOEL CLÁUDIO DA SILVA; LIMA, ROBERTA MARIA COSTA E. *ÁRVORES URBANAS BRASÍLIA Guia de Campo*. Brasília: Editora Rede de sementes do Cerrado, 2010.

KAUR, S.; GUPTA, A. K.; KAUR, N. Seed priming increases crop yield possibly by modulating enzymes of sucrose metabolism in chickpea. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 191, n. 2, p. 81-87, 2005.

LIMA, Paulo Ricardo et al. Avaliação morfofisiológica em mudas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos durante a rustificação. *Floresta e Ambiente*, v. 21, p. 316-326, 2014.

LORENZI, H. *Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil*. 2. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 1998. v. 1, 352 p.

MARTINS, J. R. et al. Seedling survival of *Handroanthus impetiginosus* (Mart ex DC) Mattos in a semi-arid environment through modified germination speed and post-germination desiccation tolerance. *Brazilian Journal of Biology*, v. 75, n. 4, p. 812-820, 2015.

NOLAN, Rachael H. et al. Safeguarding reforestation efforts against changes in climate and disturbance regimes. *Forest Ecology and Management*, v. 424, p. 458-467, 2018.

PAGNUSSAT, Gabriela Carolina et al. Nitric oxide is required for root organogenesis. *Plant physiology*, v. 129, n. 3, p. 954-956, 2002.

PELEGRINO, Milena T. et al. Nitric oxide-releasing nanoparticles: synthesis, characterization, and cytotoxicity to tumorigenic cells. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 19, n. 2, p. 57, 2017.

SARATH, Gautam et al. Nitric oxide accelerates seed germination in warm-season grasses. *Planta*, v. 223, n. 6, p. 1154-1164, 2006.

SEABRA, Amedea B.; JUSTO, Giselle Z.; HADDAD, Paula S. State of the art, challenges and perspectives in the design of nitric oxide-releasing polymeric nanomaterials for biomedical applications. *Biotechnology Advances*, v. 33, n. 6, p. 1370-1379, 2015.

SEABRA, Amedea B. et al. Nitric oxide-releasing nanomaterials: from basic research to potential biotechnological applications in agriculture. *New Phytologist*, v. 234, n. 4, p. 1119-1125, 2022.

SHISHIDO, Silvia Mika et al. Thermal and photochemical nitric oxide release from S-nitrosothiols incorporated in Pluronic F127 gel: potential uses for local and controlled nitric oxide release. *Biomaterials*, v. 24, n. 20, p. 3543-3553, 2003.

SILVA, M. E. A. da; NEGREIROS, M. L. de; SHIBATA, M. Secagem e armazenamento de sementes de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos (Bignoniaceae). *Revista de Ciências Agrárias*, Belém, v. 64, e2021008, 2021.

SILVEIRA, Neidiquele M. et al. Exogenous nitric oxide improves sugarcane growth and photosynthesis under water deficit. *Planta*, v. 244, n. 1, p. 181-190, 2016.

SILVEIRA, Neidiquele M. et al. S-nitrosoglutathione spraying improves stomatal conductance, Rubisco activity and antioxidant defense in both leaves and roots of sugarcane plants under water deficit. *Physiologia Plantarum*, v. 160, n. 4, p. 383-395, 2017.

SILVEIRA, Neidiquele M. et al. Nitric Oxide-Induced Tolerance in Plants under Adverse Environmental Conditions. In: *Approaches for Enhancing Abiotic Stress Tolerance in Plants*. CRC Press. p. 371-386, 2019a.

SILVEIRA, Neidiquele M. et al. Encapsulation of S-nitrosoglutathione into chitosan nanoparticles improves drought tolerance of sugarcane plants. *Nitric Oxide*, v. 84, p. 38-44, 2019b.

SILVEIRA, Neidiquele M. et al. Germination and initial growth of common bean plants under water deficit as affected by seed treatment with S-nitrosoglutathione and calcium chloride. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, v. 32, n. 1, p. 49-62, 2020.

VALDOVINOS, Tamara Mariel et al. Seed germination of three species of Bignoniaceae trees under water stress. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 52, p. e20207560, 2021.

VIANA, ALEXANDRE ESPÍNDOLA. Análise da qualidade fisiológica de sementes de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex Dc.) Mattos. 2018.

ZHANG, Hua; SHEN, Wen-Biao; XU, Lang-Lai. Effects of nitric oxide on the germination of wheat seeds and its reactive oxygen species metabolisms under osmotic stress. 2003.

ZHANG, Hua et al. A rapid response of β -amylase to nitric oxide but not gibberellin in wheat seeds during the early stage of germination. *Planta*, v. 220, n. 5, p. 708-716, 2005.