



**THALITA MACIEL PEREIRA**

***NANOPRIMING* COM NANOTUBO DE CARBONO DE  
PAREDES MÚLTIPLAS EM SEMENTES DE GIRASSOL SOB  
CONDIÇÕES DE ESTRESSES ABIÓTICOS**

**LAVRAS - MG  
2025**

**THALITA MACIEL PEREIRA**

***NANOPRIMING* COM NANOTUBO DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS EM  
SEMENTES DE GIRASSOL SOB CONDIÇÕES DE ESTRESSES ABIÓTICOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do Título de Doutor.

Orientadora

Profa. Dra. Michele Valquíria dos Reis

Coorientador

Dr. Antonio Rodrigues da Cunha Neto

**LAVRAS - MG  
2025**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Pereira, Thalita Maciel.

*Nanopriming* com nanotubo de carbono de paredes múltiplas  
em sementes de girassol sob condições de estresses abióticos /  
Thalita Maciel Pereira. - 2025.

60 p. : il.

Orientadora: Michele Valquíria dos Reis.

Coorientador: Antonio Rodrigues da Cunha Neto.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Nanotecnologia. 2. Nanomateriais. 3. Sementes. I. Reis,  
Michele Valquíria dos. II. Cunha Neto, Antonio Rodrigues da.  
III. Título.

**THALITA MACIEL PEREIRA**

***NANOPRIMING* COM NANOTUBO DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS EM  
SEMENTES DE GIRASSOL SOB CONDIÇÕES DE ESTRESSES ABIÓTICOS**

***NANOPRIMING* WITH MULTIWALLED CARBON NANOTUBES IN SUNFLOWER  
SEEDS UNDER ABIOTIC STRESS CONDITIONS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 15 de abril de 2025.

Profa. Dra. Fernanda Carlota Nery	UFSJ
Prof. Dr. Marcelo Pedrosa Gomes	UFPR
Prof. Dr. Guilherme Vieira Pimentel	UFLA
Prof. Dr. Antonio Rodrigues Da Cunha Neto	UNIFAL

Orientadora

Profa. Dra. Michele Valquíria dos Reis

Coorientador

Prof. Dr. Antonio Rodrigues da Cunha Neto

**LAVRAS - MG  
2025**

À minha mãe, eterna professora e mestre da vida, sempre em meu coração.

DEDICO!

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, pela saúde e pelas bênçãos que me sustentaram, pelas respostas silenciosas às minhas orações e pela luz que sempre guiou meus passos.

À minha família, meu porto seguro, pelo apoio e por me ensinar os verdadeiros valores da vida. Obrigada por me mostrarem que cada conquista exige dedicação, trabalho árduo e renúncias, mas que todo esforço sempre vale a pena.

À Professora Michele, minha orientadora, pela dedicação, paciência e pelo conhecimento compartilhado. Seu direcionamento, incentivo e confiança foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Minha eterna gratidão!

Ao meu coorientador e amigo, Antônio, por estender a mão nos momentos mais difíceis e por estar sempre presente, apoiando-me em cada desafio do doutorado. Seu apoio foi inestimável.

Aos amigos e ao meu parceiro de jornada, que se tornaram minha segunda família. Obrigada pela troca de experiências, pelo suporte nos momentos difíceis, pelas conversas que enriqueceram esta caminhada e pelas risadas que tornaram os dias mais leves.

Aos colegas de pesquisa, pelo suporte e ajuda nos experimentos, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

À Universidade Federal de Lavras, pelo suporte dos docentes e pela sempre prestativa secretária Marli, que sempre esteve pronta a auxiliar.

À Professora Heloísa e equipe, pela generosidade em ceder o Laboratório de Análise de Sementes (LAS) do setor de sementes da UFLA para a realização dos experimentos.

Ao CTNano/UFGM, pela doação do nanotubo de carbono, essencial para a pesquisa.

Ao Grupo Derks, pela cessão da área e pela disponibilidade da equipe no auxílio ao experimento a campo.

À CAPES, pelo financiamento da bolsa de estudos e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro, fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta jornada, meu sincero e aliviado agradecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

As culturas ornamentais com aplicação agrícola têm apresentado um crescimento significativo nos últimos anos. Entre elas, destaca-se o girassol (*Helianthus annuus* L.), uma espécie de grande interesse não apenas ornamental, mas também energético. No entanto a propagação dessas espécies, seja por via vegetativa ou por sementes, ainda demanda estratégias que aumentem sua eficiência e desempenho sob diferentes condições de cultivo. A qualidade das unidades de propagação é fundamental para garantir um desenvolvimento saudável e vigoroso das plantas ornamentais. Além disso, os impactos das mudanças climáticas têm impostos desafios crescentes à produção, intensificando os estresses bióticos e abióticos que podem comprometer a eficiência da propagação. Nesse contexto, a nanotecnologia surge como uma grande aliada, oferecendo soluções inovadoras, para melhorar a qualidade fisiológica das sementes, aumentar a tolerância das plantas aos estresses e otimizar os processos produtivos. O nanotubo de carbono é um material à base de cadeias carbônicas que apresenta aplicações tecnológicas promissoras, pelas características específicas como resistência térmica e mecânica e condutividade elétrica. Objetivou-se com o trabalho investigar a resposta da exposição de sementes de girassol aos nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) por meio do condicionamento fisiológico. Foram analisados os efeitos de diferentes concentrações de MWCNTs (100 mg L<sup>-1</sup>, 200 mg L<sup>-1</sup> e 400 mg L<sup>-1</sup>) e controle, em combinação com condições controladas de envelhecimento acelerado, sobre parâmetros fisiológicos, bioquímicos e morfológicos das plântulas. As avaliações incluíram o crescimento radicular, o comprimento da parte aérea, análises colorimétricas e a atividade de enzimas antioxidantes em ambientes de laboratório e de campo. Os resultados demonstraram que a concentração de 200 mg L<sup>-1</sup> de MWCNT foi a mais eficiente, para otimizar a germinação e o crescimento das plântulas, favorecendo a absorção de água e nutrientes e estimulando a ação de enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase e a catalase. Contudo observou-se que concentrações mais elevadas, como 400 mg L<sup>-1</sup>, promoveram um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), evidenciando os limites do uso dos MWCNTs. Ademais, verificou-se que os nanotubos de carbono modulam a síntese de pigmentos foliares, alterando os teores de clorofila e carotenoides, o que pode ter implicações na fotossíntese e na adaptação das plântulas a condições adversas. O nanopriming com MWCNTs mostrou-se uma estratégia promissora para a agricultura, com destaque para a concentração de 200 mg·L<sup>-1</sup>, que foi eficaz na germinação e no desenvolvimento de sementes de girassol, especialmente sob estresse salino. São necessários, entretanto mais estudos sobre segurança ambiental, viabilidade econômica,

impactos na segurança alimentar e possíveis efeitos fitotóxicos nas plantas para a sua aplicação em larga escala.

**Palavras-chave:** nanotecnologia; nanomateriais; sementes; propagação.

## ABSTRACT

Ornamental crops with agricultural applications have shown significant growth in recent years. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) stands out among them. It is a species of great interest not only for its ornamental value, but also for its energy. However, the propagation of the species, whether vegetatively or by seed, still requires strategies that increase their efficiency and performance under different cultivation conditions. The quality of propagation units is essential to ensure ornamental plants' healthy and vigorous development. Additionally, the impacts of climate change have imposed increasing challenges on production, intensifying biotic and abiotic stresses that can compromise propagation efficiency. In this context, nanotechnology emerges as a great ally, offering innovative solutions to improve the physiological quality of seeds, increase plant tolerance to stress, and optimize production processes. Carbon nanotubes are carbon chain-based materials with promising technological applications due to their specific characteristics, such as thermal and mechanical resistance and electrical conductivity. This study investigated the response of sunflower seeds to multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) through physiological conditioning. The effects of different concentrations of MWCNTs (100 mg L<sup>-1</sup>, 200 mg L<sup>-1</sup>, and 400 mg L<sup>-1</sup>) and the control, in combination with controlled accelerated aging conditions, on the physiological, biochemical, and morphological parameters of seedlings were analyzed. Evaluations included root growth, aerial part length, colorimetric analyses, and the activity of antioxidant enzymes in laboratory and field environments. The results demonstrated that 200 mg L<sup>-1</sup> of MWCNT was the most efficient to optimize seedling germination and growth, favoring the absorption of water and nutrients and stimulating the action of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase and catalase. However, higher concentrations, such as 400 mg L<sup>-1</sup>, increased the production of reactive oxygen species (ROS), demonstrating the limits of using MWCNTs. Furthermore, it was found that carbon nanotubes modulate the synthesis of leaf pigments, altering the levels of chlorophyll and carotenoids, which may affect photosynthesis and seedling adaptation to adverse conditions. Nanoprimering with MWCNTs is a promising strategy for agriculture, emphasizing the concentration of 200 mg·L<sup>-1</sup>, which was effective in germinating and developing seedling sunflower seeds, especially under saline stress. However, further studies on environmental safety, economic viability, impacts on food security, and possible phytotoxic effects on plants are necessary for its large-scale application.

**Keywords:** nanotechnology; nanomaterials; seeds; propagation.

## INDICADORES DE IMPACTO

A agricultura enfrenta desafios cada vez mais complexos, exigindo soluções inovadoras para aumentar a produtividade e a resiliência das culturas. Entre essas inovações, a nanotecnologia surge como uma ferramenta poderosa, e os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) apresentam um grande potencial para melhorar a germinação e o desenvolvimento das plantas. Esse avanço está diretamente relacionado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima). Este estudo avaliou o impacto dos MWCNTs em sementes de girassol (*Helianthus annuus* L.), por meio do nanopriming, testando concentrações de 100, 200 e 400 mg·L<sup>-1</sup> em condições controladas. Além das condições de cultivo padrão, as sementes foram expostas a estresses abióticos, incluindo estresse salino, estresse hídrico (déficit hídrico) e envelhecimento acelerado, para simular condições ambientais adversas. Parâmetros fisiológicos, bioquímicos e morfológicos foram avaliados para determinar a eficácia dos tratamentos. A concentração de 200 mg·L<sup>-1</sup> foi a mais eficaz, promovendo um aumento significativo no vigor das plântulas, melhor absorção de água e nutrientes e maior resistência ao estresse oxidativo, como indicado pelo aumento da atividade das enzimas antioxidantes, como a superóxido dismutase (SOD) e a catalase (CAT). No entanto a concentração de 400 mg·L<sup>-1</sup> resultou em uma produção elevada de espécies reativas de oxigênio (ROS), evidenciando a necessidade de otimizar a dosagem para evitar efeitos fitotóxicos. Além disso, observou-se que os MWCNTs influenciaram a síntese de pigmentos foliares, alterando os níveis de clorofila e carotenoides, o que pode impactar a fotossíntese e a adaptação das plântulas ao estresse. O nanopriming com MWCNTs se apresenta como uma estratégia promissora, para melhorar o desempenho das culturas em condições ambientais adversas, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas. Essa abordagem pode favorecer a implementação de sistemas agrícolas mais eficientes e adaptáveis, alinhados aos objetivos globais de sustentabilidade. No entanto mais estudos são necessários, para avaliar a segurança ambiental, os impactos em longo prazo e a viabilidade econômica da aplicação em larga escala dessa tecnologia. O futuro da agricultura pode, de fato, ser moldado pela nanotecnologia, mas esse caminho precisa ser trilhado com rigor científico e responsabilidade, garantindo que seus benefícios sejam integrados de forma responsável nos sistemas alimentares e alinhados aos princípios do desenvolvimento sustentável.

## IMPACT INDICATORS

Agriculture is facing increasingly complex challenges, demanding innovative solutions to enhance crop productivity and resilience. Among these innovations, nanotechnology emerges as a powerful tool, with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) showing significant potential to improve seed germination and plant development. This advancement aligns directly with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), and SDG 13 (Climate Action). This study assessed the impact of MWCNTs on sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds through nanopriming, testing concentrations of 100, 200, and 400 mg·L<sup>-1</sup> under controlled conditions. In addition to standard growth conditions, seeds were exposed to abiotic stress factors, including salt stress, water deficit (drought stress), and accelerated aging, to simulate adverse environmental conditions. Physiological, biochemical, and morphological parameters were evaluated to determine the treatment efficacy. The 200 mg·L<sup>-1</sup> concentration proved to be the most effective, significantly promoting seedling vigor, enhancing water and nutrient uptake, and improving resistance to oxidative stress, as indicated by increased activity of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT). However, the 400 mg·L<sup>-1</sup> concentration resulted in increased production of reactive oxygen species (ROS), highlighting the importance of optimizing the dosage to prevent phytotoxic effects. Furthermore, MWCNTs influenced the synthesis of foliar pigments, altering chlorophyll and carotenoid levels, which may impact photosynthesis and seedling adaptation to stress. Nanopriming with MWCNTs emerges as a promising strategy to enhance crop performance under adverse environmental conditions, contributing to more sustainable and climate-resilient agricultural practices. This approach supports the development of more efficient and adaptive agricultural systems aligned with global sustainability goals. However, further studies are needed to evaluate the environmental safety, long-term effects, and economic feasibility of large-scale application of this technology. The future of agriculture may indeed be shaped by nanotechnology, but this path must be pursued with scientific rigor and responsibility, ensuring that its benefits are responsibly integrated into food systems and aligned with the principles of sustainable development.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fase I e II do condicionamento osmótico em sementes. ....	18
Figura 2 - Representação esquemática do condicionamento osmótico. ....	19
Figura 3 - Desenho experimental da disposição das plantas em campo.....	28
Figura 4 - (A) Porcentagem de germinação de sementes de girassol em diferentes tempos de envelhecimento acelerado. (B) Porcentagem de plântulas normais de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono em diferentes tempos de envelhecimento acelerado.....	32
Figura 5 - (A) Comprimento radicular de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (B) Comprimento de parte aérea de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado.....	33
Figura 6 - Comparação entre plântulas de girassol sem exposição a nanotubos de carbono após 48 horas de envelhecimento acelerado (A) e plântulas expostas a 200 mg L <sup>-1</sup> de nanotubos de carbono (B) sob as mesmas condições de envelhecimento acelerado (48 horas).....	34
Figura 7 - (A) Parâmetro a* de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (B) Parâmetro b* de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. ....	35
Figura 8 - (A) Peróxido de hidrogênio de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (B) Peroxidação lipídica de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado.....	36
Figura 9 - Plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado (A) Superóxido dismutase de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (B) Catalase de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (C) Ascorbato peroxidase de plântulas	

de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. ....	39
Figura 10 - (A) Taxa de germinação entre os tratamentos com água e cloreto de sódio (NaCl) e entre as diferentes concentrações de nanotubos de carbono.....	40
Figura 11 - Porcentagem de plântulas normais sob diferentes tratamentos de priming e estresse hídrico (H <sub>2</sub> O vs. PEG). A germinação não apresentou diferenças entre os tratamentos, mantendo-se em 95%. No entanto houve diferenças significativas na formação de plântulas normais.....	41
Figura 12 - (A) Concentração de peróxido de hidrogênio (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) e (B) peroxidação lipídica (MDA) em plântulas submetidas a diferentes tratamentos de priming e condições de estresse salino (NaCl). ....	42
Figura 13 - (A) Níveis de peróxido de hidrogênio (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) e (B) peroxidação lipídica (MDA) sob diferentes tratamentos de priming (sem priming, hidropriming e concentrações de 100, 200 e 400 mg L <sup>-1</sup> de MWCNTs).....	43
Figura 14 - Girassol em campo, após 50 dias de cultivo, proveniente de sementes tratadas com diferentes concentrações de nanotubos de carbono. ....	44
Figura 15 - (A) Massa fresca de raiz e (B) diâmetro do capítulo floral de girassol com 70 dias expostas ao condicionamento fisiológico com diferentes concentrações de nanotubos de carbono. ....	45
Figura 16 - (A1, A2) Raiz e capítulo de plantas sem hidrocondicionamento, após 70 dias de plantio. (B1, B2) Raiz e capítulo de plantas tratadas com 200 mg L <sup>-1</sup> de nanotubos de carbono, após 70 dias de exposição ao condicionamento fisiológico. ....	46

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1	Girassol	15
2.2	Germinação de sementes	16
2.3	Condicionamento fisiológico	17
2.4	Nanopriming	20
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>23</b>
3.1	Condução experimental	23
3.2	Teste de germinação	24
3.3	Parâmetros morfológicos	24
3.4	Parâmetros colorimétricos	25
3.5	Quantificação de peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica	25
3.6	Enzimas do sistema antioxidante	25
3.7	Delineamento experimental e análises estatísticas	26
3.8	Condução experimental	27
3.9	Crescimento inicial	28
3.10	Parâmetros colorimétricos	28
3.11	Desenvolvimento final	29
3.12	Delineamento experimental e análises estatísticas	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>30</b>
4.1	Experimento 1 - Nanopriming de sementes de girassol com nanotubos de carbono de paredes múltiplas e envelhecimento acelerado	30
4.2	Condições de estresse	40
4.3	Experimento 2 - Nanopriming de sementes de girassol com nanotubos de carbono de paredes e seu desenvolvimento em campo	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE A - TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO REGISTRADAS NO LOCAL DO EXPERIMENTO – GRUPO DERKS, RESTINGA GROSSA, GLEBA 5</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma cultura de ampla aplicabilidade, destacando-se pela produção de grãos e óleo vegetal, valor ornamental, uso na alimentação animal, fitorremediação de solos e adubação verde. É uma das espécies vegetais com maior potencial para pesquisas de energia renovável (Almeida *et al.*, 2019; Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2021). Por ser sensível a temperaturas extremas, a forma de propagação e a qualidade inicial são essenciais para uma alta produtividade (Mamo; Rahnama; Hassibi, 2023).

A germinação de sementes é um processo em que mudanças fisiológicas e morfológicas ocorrem ordenadas dependentes de um conjunto de condições ambientais, podendo ser influenciada por fatores, como falta de água, temperaturas adversas e solo salino. Esses fatores adversos podem causar estresse oxidativo nas sementes (Adetunji *et al.*, 2021), afetando o crescimento das mudas e a produtividade da planta. Portanto a utilização de tratamentos em sementes que favoreçam o estabelecimento inicial rápido e uniforme das plântulas são essenciais para alcançar um bom rendimento na cultura do girassol.

Uma das técnicas mais utilizadas para a uniformização do processo germinativo é o condicionamento fisiológico ou priming, que é responsável por hidratar a semente em um nível suficiente, para permitir eventos metabólicos de pré-germinação, entretanto insuficiente para permitir a emergência da radícula, podendo ser feito pelo hidrocondicionamento e do osmocondicionamento (Adetunji *et al.*, 2021). Os avanços atuais, na área do condicionamento de sementes, podem ser abordagens promissoras para a germinação de sementes e o desenvolvimento de plantas em diferentes condições ambientais (Silva *et al.*, 2019). Nesse sentido, a aplicação de nanopartículas, via condicionamento de sementes, conhecido como nanopriming, é uma área de estudo inovadora e com resultados preliminares promissores.

No ramo da nanotecnologia, a definição de partícula é um pedaço de matéria com fronteiras físicas definidas (Antunes Filho; Backx, 2020). Quando em tamanho nano, materiais tendem a mudar suas propriedades e, dessa forma, torna-se possível a criação ou aperfeiçoamento de determinados produtos, reunindo benefícios como controle de liberação, estabilidade e direcionamento de moléculas bioativas, como hormônios, nutrientes, fármacos ou antioxidantes, para sítios específicos de ação (Almeida; Santos; Tescarollo, 2023). A nanotecnologia tem um papel promissor, na transformação da produção de alimentos e da agricultura, diminuindo assim a necessidade excessiva de fertilizantes e defensivos químicos e, também, favorecendo a germinação e o vigor das sementes (Ferreira; Perez-Marin, 2022). O mecanismo por trás do aumento de germinação de sementes com o uso do nanopriming é

viabilizado pelo pequeno tamanho dessas partículas que permite a entrada em meio às membranas de maneira facilitada aprimorando assim a técnica de priming (Waqas *et al.*, 2019).

O nanotubo de carbono é um material à base de cadeias carbônicas que apresenta aplicações tecnológicas promissoras, por sua resistência, flexibilidade e alta condutividade (Camargo; Semmer; Silva, 2017). Pode ser visualizado como uma tira de grafeno enrolada, formando um cilindro e possui uma combinação única de rigidez e resistência. Além disso, destaca-se por sua alta razão superfície-volume, estabilidade química, capacidade de penetração celular e possibilidade de funcionalização, o que permite maior interação com tecidos vegetais e transporte eficiente de moléculas. Essas propriedades favorecem sua aplicação na agricultura, permitindo o aumento da eficiência fisiológica das sementes e potencial melhora no desempenho em condições adversas (Smirnova *et al.*, 2011). Diante disso, objetivou-se investigar as respostas fisiológicas, morfológicas e químicas da exposição de sementes de girassol aos nanotubos de carbono de paredes múltiplas por meio do condicionamento fisiológico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Girassol

O girassol (*Helianthus annuus* L.), originário do México e pertencente à família Asteraceae, foi inicialmente cultivado para alimentação de pássaros, produção de óleo comestível e formulação de rações. Atualmente, destaca-se como uma cultura promissora para a produção de biodiesel, pelo seu elevado teor de óleo e qualidade, sendo considerado uma importante fonte de matéria-prima para pesquisas em energia renovável (Araújo *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2017).

Além da sua função como produto em biocombustíveis, o girassol é uma planta ornamental que pode ser usada em cultivo em vasos e como flor de corte. Em geral, ele é usado em decoração, já que o formato exótico e a intensa cor laranja-amarelada de suas flores dão vida e dinamismo às paisagens. Além disso, o girassol pode gerar renda para pequenos agricultores, pois exige pouca área e favorece a apicultura, contribuindo para a permanência da mão de obra no campo (Nascimento *et al.*, 2016; Santos; Castilho, 2018).

As características do girassol, como altura e largura da inflorescência, variam, de acordo com o genótipo e as condições edafoclimáticas, bem como a época de semeadura, podem ser alterados, em função da viabilidade das sementes, sendo essa a principal forma de propagação da espécie (Nascimento *et al.*, 2016). A produção de girassol ornamental desperta grande interesse aos produtores e investidores, em virtude de sua alta rentabilidade, demanda de pequenas áreas, produção intensiva e o rápido retorno do capital investido (Oliveira *et al.*, 2017). Além disso, quando se trata da produção de girassol para grão no Brasil, destaca-se o estado de Goiás, responsável por aproximadamente 73% da produção nacional, seguido por Minas Gerais com 13% e Mato Grosso com 7,3% (Brasil, 2024).

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é sensível ao déficit hídrico, especialmente nas fases próximas à floração, entre 10 a 15 dias antes e após esse período. A escassez de água nesses momentos pode reduzir a produção de aquênios, o teor de óleo das sementes e provocar senescência precoce das folhas, comprometendo a fotossíntese e a produtividade da cultura (Sousa, 2019). Em função disso, cada vez mais busca-se estabelecer práticas de cultivo do girassol que minimizem os efeitos de estresses ambientais, garantindo maior estabilidade e produtividade à cultura (Araújo *et al.*, 2018). Sendo assim, para atingir a produtividade esperada, é necessário ter atenção na forma de propagação e na qualidade das sementes utilizadas (Santos; Castilho, 2018), visto que sementes de alta qualidade podem ser classificadas

como aquelas que apresentam alta capacidade de germinação aliada a alto vigor, o que resulta no estabelecimento uniforme de mudas mesmo em condições adversas (Marcos-Filho, 2016; Morais *et al.*, 2021).

## 2.2 Germinação de sementes

A germinação de sementes é um processo que induz alterações fisiológicas e morfológicas ordenadas, dependentes de um conjunto de condições ambientais e que vão envolver interações entre diversos hormônios, ativação do metabolismo, reparo de DNA e proteínas (Melo *et al.*, 2021; Xiong *et al.*, 2021). Trata-se de um ponto crucial no estabelecimento de espécies e na sua propagação em campo. A compreensão dessa fase do desenvolvimento é importante no que tange à busca por técnicas que permitam um processo eficaz (El-Sanatawy *et al.*, 2021).

A maturação irregular das sementes de girassol (Rondanini; Savin; Hall, 2007), a contaminação por microrganismos (Delaux; Schornack, 2021) e a dormência pós-colheita (Dogramaci *et al.*, 2024) estão entre os principais fatores que comprometem o potencial fisiológico das sementes, afetando negativamente o estabelecimento e o desenvolvimento inicial das mudas no campo (Finch-Savage; Bassel, 2016).

Fatores ambientais, como falta de água, oscilações de temperatura e solos salinos, podem influenciar diretamente na germinação e estabelecimento de mudas. Quando expostas a essas situações, as sementes tornam-se suscetíveis à ação do estresse oxidativo, ou seja, o desequilíbrio entre a produção de espécies reativas (ROS) e os mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos (Noctor; Reichheld; Foyer, 2018). A ação das enzimas do sistema antioxidante, como a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e peroxidase (POX), desempenham um papel fundamental na eliminação do excesso de EROS, mitigando os efeitos nocivos nas sementes (Kumar *et al.*, 2015).

Dessa forma, a ausência de condições ideais que viabilizam a germinação das sementes leva à redução de velocidade de emergência, desenvolvimento de mudas; afeta o número de folhas desenvolvidas; e, na produção de sementes, a quantidade, o tamanho e peso também são comprometidos, o que conseqüentemente afeta a produtividade (Melo *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2020). Portanto a utilização de tratamentos nas sementes que favoreçam o estabelecimento rápido e uniforme do girassol no campo são determinantes para o seu rendimento pelas características das sementes e à gama de condições ambientais a que a cultura está sujeita (Barros *et al.*, 2021).

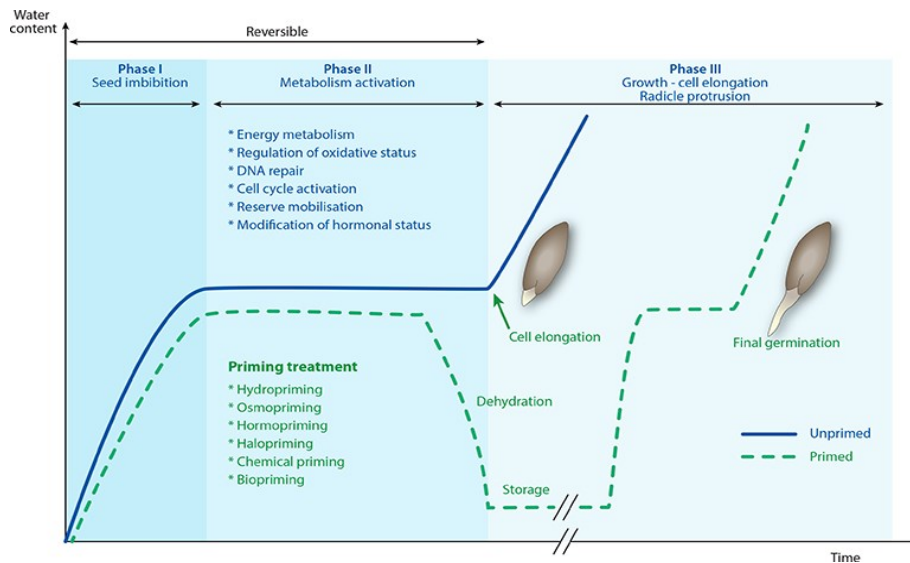
Nesse sentido, o condicionamento fisiológico das sementes tem se mostrado como alternativa promissora, atenuando efeitos negativos do estresse. Em algumas espécies, essa técnica proporciona germinação mais uniforme e sincronizada, elevado índice de emergência e desenvolvimento de plântulas, mesmo sob condições de estresses abióticos adversos, além de elevada taxa de crescimento da parte aérea (Arunkumar; Jegadeeswari; Ushamalini, 2019).

### **2.3 Condicionamento fisiológico**

Uma das técnicas utilizadas, para a uniformização do processo germinativo, é o condicionamento fisiológico ou priming, que compreende a embebição da semente, nas fases I e II do padrão trifásico, sem chegar à fase III, caracterizada pelo início da protrusão da raiz (Missio *et al.*, 2018). Essa embebição acontece em nível suficiente, para permitir eventos metabólicos de pré-germinação, entretanto insuficiente para permitir a emergência da radícula (Ramalho *et al.*, 2020). O uso de técnicas como o condicionamento permitem o beneficiamento fisiológico de sementes, com o intuito de aumentar a porcentagem de germinação e emergência das plantas em um período mais rápido de tempo (Missio *et al.*, 2018).

O priming é uma técnica realizada, durante as duas fases iniciais do processo de embebição, sendo a fase I marcada pela rápida captação de água por sementes secas e reativação de processos metabólicos (Melo *et al.*, 2021). Na fase II, ocorre o processo de mobilização de reservas, ativação e síntese de enzimas, reparo de DNA, síntese de RNA e síntese de novas proteínas, tornando os precursores usados na síntese de macromolécula que estarão disponíveis para as sementes (Melo *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2020). Esse processo pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Fase I e II do condicionamento osmótico em sementes.

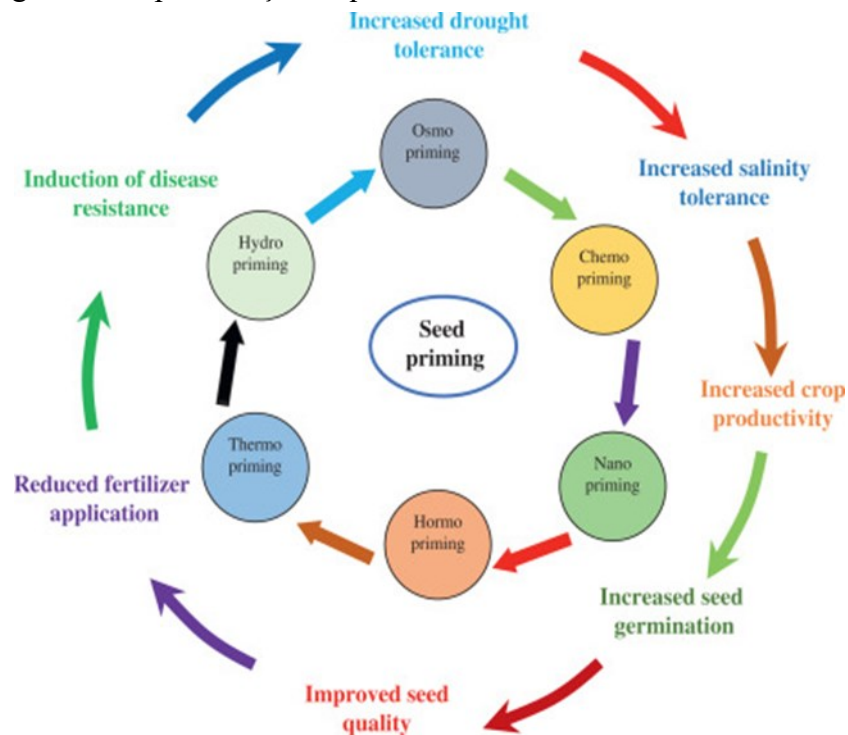


Fonte: Lutts *et al.* (2016).

O priming pode ser realizado por intermédio do hidrocondicionamento (utilizando água) e do osmocondicionamento (utilizando soluções com potencial osmótico conhecido para controlar a embebição das sementes, como polietilenoglicol, manitol e sais) (Kubala *et al.*, 2015).

Em razão de possíveis efeitos potenciais, ao aplicar a técnica de priming osmótico, é necessário adaptar o procedimento à espécie que será utilizada (Oliveira *et al.*, 2021). Em nível celular, as membranas e proteínas podem ser danificadas por EROs, por mudanças nos níveis, resultando em inativação enzimática (Melo *et al.*, 2021). Em condições ideais, os níveis de EROs são regulados por enzimas e outros complexos não enzimáticos (Figura 2), no entanto o acúmulo excessivo dessas moléculas podem levar ao estresse oxidativo. Enzimas, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), atuam regulando o acúmulo de EROs e minimizando o dano oxidativo que seriam os responsáveis em causar danos à membrana lipídica e extravasamento de eletrólitos (Kaur *et al.*, 2019).

Figura 2 - Representação esquemática do condicionamento osmótico.



Fonte: Lutts *et al.* (2016).

Os avanços atuais, no condicionamento de sementes, provaram ser abordagens promissoras para melhorar a germinação de sementes e o desenvolvimento de plantas em comparação com os métodos tradicionais de condicionamento de sementes (Badawy *et al.*, 2021; Khalaki *et al.*, 2021).

Barros *et al.* (2021) demonstrou que o condicionamento osmótico promove o aumento da atividade de enzimas antioxidantes, especialmente em sementes de girassol com menor vigor, resultando em maior tolerância ao estresse térmico durante a germinação. De forma semelhante, Albuquerque e Carvalho (2023) avaliou o efeito do condicionamento fisiológico, utilizando soluções de PEG e  $KNO_3$ , em sementes submetidas a diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que o tratamento favoreceu a germinação e o vigor, principalmente em condições subótimas, evidenciando a eficácia da técnica em superar a dormência e melhorar o desempenho fisiológico das sementes sob estresse térmico.

Nesse contexto, a aplicação de nanopartículas, via condicionamento de sementes, surge como uma abordagem inovadora e promissora. Estudos preliminares apontam resultados positivos na indução de tolerância a estresses abióticos e na melhoria do desempenho germinativo (Hussain *et al.*, 2019; Kasote *et al.*, 2019; Khalaki *et al.*, 2021), ampliando as

possibilidades de uso do condicionamento fisiológico em sementes, inclusive em culturas como o girassol.

## 2.4 Nanopriming

No ramo da nanotecnologia, a definição de partícula é um objeto pequeno com suas propriedades físico-químicas distintas na escala nanométrica. Para estar na escala nanométrica, uma partícula geralmente precisa ter o tamanho na faixa de, aproximadamente, 1 a 100 nanômetros (nm) (International Organization for Standardization - ISO, 2019). Logo as nanopartículas (NPs), por exemplo, são quaisquer partículas distintas com as três dimensões externas na escala nanométrica (Antunes Filho; Backx, 2020).

A nanotecnologia é uma área da ciência responsável pelos estudos e produção de sistemas estruturados em escalas nanométricas. Em sua forma nano, materiais tendem a mudar suas propriedades e, dessa forma, é possível a criação ou aperfeiçoamento de determinados produtos, reunindo benefícios como controle de liberação, estabilidade e direcionamento de moléculas para o local de ação (Almeida; Santos; Tescarollo, 2023).

Essa tecnologia tem um papel promissor na transformação da produção de alimentos e da agricultura, aumentando sua superfície de contato com o objeto em questão, reduzindo assim o uso excessivo de fertilizantes e produtos químicos, além de resultados demonstrarem um efeito benéfico na germinação e o vigor de sementes de algumas espécies (Ferreira; Perez-Marin, 2022).

A alta germinação de sementes com o uso do nanopriming é viabilizada pelo pequeno tamanho dessas partículas que permite a entrada da solução em meio às membranas de maneira facilitada (Waqas *et al.*, 2019). Diversas soluções podem ser usadas nessa técnica, como, por exemplo, Sarkar *et al.* (2021) descrevem a utilização de nanopartículas à base de CuO como sendo vantajosas para auxiliar uma melhor embebição em sementes de *Vigna radiata*. Afzal *et al.* (2021) descrevem a utilização de nanocompostos à base de óxidos de ferro como vantajoso na germinação de arroz. Assim, essa técnica gera o aumento da taxa de germinação, o crescimento das plântulas, influencia o metabolismo e o ciclo de vida da planta (Khalaki *et al.*, 2021).

No estudo com plântulas, a aplicação de nanopriming pode levar à resistência a doenças e a estresses abióticos (Lee; Kasote, 2024), sendo capaz de aumentar a biomassa e induzir o aparato fotossintético e bioquímico (Kandhol *et al.* 2022). A técnica é capaz de estimular o sistema antioxidante, pelo aumento de catalase e superóxido dismutase levando então a uma

maior proteção na presença de estresses abióticos e bióticos (Mazhar *et al.*, 2023). Entretanto devem ser avaliados quais elementos serão acoplados aos nanotubos e em quais concentrações e condições serão aplicados, já que podem se tornar tóxicos às plantas (Timóteo *et al.*, 2019).

O grafeno é um material à base de cadeias carbônicas que apresenta, além de seu tamanho e forma nanométricos, propriedades que o tornam um composto promissor. Essas características o tornam um dos principais focos em pesquisa na área de engenharia de materiais, sobretudo, por ser matéria-prima no desenvolvimento de nanotubos de carbono. Mesmo sendo um material promissor, a reprodutibilidade e a produção em larga escala estão sendo objetivos desafiadores para a ciência (Camargo; Semmer; Silva, 2017).

Entre as diversas possibilidades de condicionantes existentes, os nanotubos de carbono possuem forma de tubo e propriedades elétricas, mecânicas e ópticas que podem ser aplicadas em diferentes áreas do conhecimento. Podem ser visualizados como uma tira de grafeno enrolada formando um cilindro e possuem uma combinação única de rigidez e resistência (Reis *et al.*, 2018). Entre os tipos de nanotubos de carbono, os nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT) são compostos por várias camadas concêntricas de grafeno, oferecendo maior resistência e maior estabilidade quando comparados aos nanotubos de carbono simples (SWCNT).

São nanomateriais de maior interesse tecnológico, pois possuem grande potencial de inovação biotecnológico. A importância dos estudos, em relação à aplicabilidade dos nanotubos de carbono, ocorre pelo seu atual emprego e sua grande expectativa de utilização em aplicações tecnológicas em diversas áreas (Andrade *et al.*, 2017). Ainda existem diversas possibilidades, para a aplicação do nanoprimer em combinação com diferentes metabólitos secundários, como quitosana, lignina e celulose, entre outros biopolímeros, ampliando as perspectivas promissoras para o futuro (Kandhol *et al.*, 2022).

Entre as diversas áreas de aplicações, os nanotubos de carbono podem ser empregados em testes de detecção de biomoléculas, possibilitando seu emprego em ensaios e condicionamentos *in vivo* (Reis *et al.*, 2018). Existem relatos de que os nanotubos de carbonos possuem alta biocompatibilidade e baixa ou nenhuma toxicidade quando usado em menores concentrações.

Os nanotubos de carbono (CNTs) podem ser aplicados na nanofitorremediação, abordagem que une nanotecnologia à fitorremediação tradicional e tem se mostrado promissora na recuperação de ambientes contaminados. Segundo Gomes (2025), os CNTs aumentam a biodisponibilidade de contaminantes no solo e estimulam o crescimento das plantas, potencializando a absorção de poluentes. Nesse cenário, os girassóis (*Helianthus annuus*) se

destacam por sua resistência, rápido crescimento e alta capacidade de extração de metais pesados. A associação entre CNTs e girassóis representa uma estratégia eficiente e sustentável para a descontaminação de solos. Contudo, a segurança ambiental dessa tecnologia depende de pesquisas contínuas, regulamentações sólidas e do uso de materiais biodegradáveis e ecocompatíveis.

A funcionalização dos nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) é um aspecto crucial no processo de sua obtenção, pois influencia diretamente sua biocompatibilidade e manutenção da viabilidade celular (Oliveira *et al.*, 2020). A ausência de uma funcionalização adequada pode favorecer a agregação dessas estruturas e aumentar sua toxicidade, comprometendo seu uso seguro em aplicações biotecnológicas e agronômicas. Dessa maneira, os nanotubos despontam como uma abordagem promissora e potencialmente sustentável para a agricultura, contribuindo para a melhoria do desempenho das culturas e da eficiência no uso de insumos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi dividido em dois experimentos, laboratório e campo, descritos a seguir.

Experimento 1 - Nanoprimering de sementes de girassol com nanotubos de carbono de paredes múltiplas expostas ao envelhecimento acelerado, estresse salino e restrição hídrica

#### 3.1 Condução experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes (LCPS), no Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras, utilizando-se sementes de girassol (*Helianthus annuus*). As sementes foram divididas em dois lotes, para a realização dos experimentos. Primeiro as sementes passaram por um envelhecimento acelerado, seguidas de condicionamento com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs), em diferentes concentrações; no segundo lote, as sementes foram condicionadas com MWCNTs em diferentes concentrações e submetidas a duas condições de estresse: estresse salino e restrição hídrica.

Com o primeiro lote de sementes de girassol, o teste de envelhecimento acelerado foi realizado pelo método da caixa plástica (McDonald; Phaneendranath, 1978), em que as sementes de girassol foram distribuídas em camadas únicas sob uma tela, com uma amostra padrão de 200 g, fechadas hermeticamente para manter a massa constante. As caixas foram colocadas em câmaras de germinação tipo B.O.D., com temperaturas de 40 °C por 24, 48 e 72 horas, totalizando três tratamentos. Após o envelhecimento, as sementes foram condicionadas como descrito a seguir.

Para o condicionamento fisiológico utilizando MWCNTs, foi preparada uma solução estoque, utilizando 1 g de MWCNTs funcionalizados com ácido carboxílico, fornecidos pelo CTNano-UFG, em 1 L de água destilada, resultando em uma solução com concentração de 1000 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs. A solução foi acondicionada em um béquer e levada ao sonicador (Branson - Digital Sonifier®, modelos 250 & 450) com amplitude de 50% por 15 minutos, repetido três vezes. Após a homogeneização, a solução foi transferida para um frasco âmbar, protegida com papel alumínio e mantida sob refrigeração até a utilização.

A partir da solução estoque, foram realizadas diluições em água destilada para obter os tratamentos com concentrações de 100 mg L<sup>-1</sup>, 200 mg L<sup>-1</sup> e 400 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs. As sementes de girassol foram imersas em recipientes com aeração preparadas para as diferentes concentrações de MWCNTs e, em água destilada, para o tratamento de hidrocondicionamento,

por um período de 24 horas, 15 °C e mantidas no escuro. Após a exposição aos tratamentos, as sementes passaram pela etapa de secagem em estufa a 25 °C com circulação de ar forçada por 24 horas. Após esse período, foram realizados os testes de germinação das sementes e análises morfológicas e bioquímicas das plântulas.

Utilizando-se da mesma metodologia descrita acima, um segundo lote de sementes foi dividido em quatro tratamentos: sementes condicionadas (100 mg L<sup>-1</sup>, 200 mg L<sup>-1</sup> e 400 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs) e não condicionadas (controle). Após esses tratamentos, as sementes foram submetidas às diferentes condições de germinação: condição controle (água destilada), condição de estresse salino via solução de NaCl (40g 100 ml<sup>-1</sup>) e condição de restrição hídrica induzida por polietileno glicol 6000 - PEG (-0,6MPa) (Albuquerque; Carvalho, 2023). As sementes foram analisadas via teste de germinação e as plântulas avaliadas quanto a parâmetros morfológicos e bioquímicos.

### **3.2 Teste de germinação**

O teste de germinação foi realizado nos dois lotes, seguindo as recomendações das Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009), que estabelecem os procedimentos padrões para a condução dos testes de germinação de sementes. As sementes dos dois lotes e todos os tratamentos foram dispostas entre folhas de papel de germinação e então formados rolos de papel de germinação, umedecidos com água destilada em quantidade equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco e mantidos em sacos plásticos para evitar a perda de umidade. Os rolos foram montados com 50 sementes cada com quatro repetições por tratamento. Os rolos foram colocados em câmaras de germinação do tipo B.O.D., mantendo a temperatura constante de 25 °C e fotoperíodo de 12 horas de luz. O experimento foi conduzido até o 14º dia e avaliados a protrusão radicular (germinação) e a porcentagem de plântulas normais.

### **3.3 Parâmetros morfológicos**

Os parâmetros morfológicos foram avaliados apenas no melhor tratamento referente ao experimento de envelhecimento acelerado, sendo avaliados os parâmetros de comprimento de raiz e parte aérea no 14º dia. Para isso, todas as plântulas normais fotografadas e inseridas no programa AxionVision 4.8, o qual foi calibrado de acordo com a escala obtida pelas imagens e utilizado para mensurar os parâmetros morfológicos avaliados.

### 3.4 Parâmetros colorimétricos

Selecionando o melhor tratamento do envelhecimento acelerado, também aos 14 dias, as plântulas de girassol submetidas às diferentes concentrações de MWCNTs foram fotografadas e analisadas no software Adobe para avaliação dos parâmetros colorimétricos LAB das folhas cotiledonares. Foram mensurados os parâmetros  $a^*$  (adimensional) referente aos comprimentos de onda das cores vermelha (valores positivos) e verde (valores negativos);  $b^*$  (adimensional) referente aos comprimentos de onda das cores amarela (valores positivos) e azul (valores negativos);  $L^*$  (adimensional) que se refere à luminosidade da amostra (quanto mais positivo, mais clara é a amostra; quanto mais negativo, mais escura) (Cunha Neto *et al.*, 2024).

### 3.5 Quantificação de peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica

A quantificação de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e peroxidação lipídica (MDA) foram realizadas nos dois lotes de sementes. Para isso, amostras com 0,2 g de plântulas retiradas no 14º dia foram maceradas em nitrogênio líquido acrescido de 20% de PVPP (m/v), homogeneizadas em 1,5 mL de ácido tricloroacético (TCA) 0,1% (m/v) e centrifugadas a 12.000 g por 15 minutos a 4 °C. O  $H_2O_2$  foi determinado, medindo-se a absorbância a 390 nm, em um meio de reação, contendo tampão fosfato de potássio 100 mM com pH 7,0 e iodeto de potássio 1 M (Velikova *et al.*, 2000).

A peroxidação lipídica foi determinada, por meio da quantificação de espécies reativas ao ácido tiobarbitúrico, conforme descrito por Buege e Aust (1978). O extrato foi obtido de acordo com Velikova *et al.* (2000). Aliquotas (250  $\mu$ L) do sobrenadante foram adicionadas ao meio de reação de ácido tiobarbitúrico (TBA) 0,5% (m/v) e 10% (m/v) de TCA, incubando-se, em seguida, a 95 °C por 30 minutos. A reação foi paralisada por resfriamento rápido em gelo, e as leituras foram determinadas em espectrofotômetro, a 535 nm e 600 nm.

### 3.6 Enzimas do sistema antioxidante

A extração das enzimas antioxidantes foi realizada nos dois lotes de sementes, utilizando-se 200 mg de massa fresca das plântulas normais de girassol de cada tratamento, maceradas em nitrogênio líquido e homogeneizadas em 1,5 mL do tampão de extração. Os homogeneizados foram centrifugados a 12.000 g, por 30 minutos, a 4 °C, coletando-se os

sobrenadantes para as análises enzimáticas, conforme apresentado por Biemelt, Keetman e Albrecht (1998).

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi determinada pela capacidade da enzima inibir a redução fotoquímica do nitro blue tetrazolium (NBT), proposta por Giannopolitis e Ries (1977). Os tubos contendo o tampão juntamente com a amostra e o controle (meio de incubação sem a amostra) foram iluminados com lâmpada fluorescente de 20W por 7 minutos e as leituras realizadas a 560 nm. Uma unidade de SOD é definida pela quantidade de enzima que inibe 50% da taxa de redução do NBT. A leitura foi feita a 560 nm em espectrofotômetro.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada pelo decréscimo na absorbância a 240 nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio (Havir; Mchale, 1987). A reação foi iniciada pela adição do  $H_2O_2$  ( $\epsilon = 36 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ). Uma unidade de CAT é definida pela quantidade de enzima necessária para decompor  $1 \mu\text{mol min}^{-1}$  de  $H_2O_2$ . A atividade da (APX) foi determinada pela diminuição da absorbância do ascorbato ( $\epsilon = 2,8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) a 290 nm a cada 15 segundos, durante 3 minutos, segundo (Nakano; Asada, 1981). Uma unidade de APX é definida pela quantidade de enzima que oxida  $1 \mu\text{mol min}^{-1}$  de ácido ascórbico.

### **3.7 Delineamento experimental e análises estatísticas**

O delineamento experimental para o teste de germinação foi inteiramente casualizado em fatorial duplo  $4 \times 4 + 1$  referente aos tempos de envelhecimento acelerado (0 h, 24 h, 48 h e 72 h), concentrações de nanotubos de carbono de paredes múltiplas ( $0 \text{ mg L}^{-1}$  - hidroprime,  $100 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $200 \text{ mg L}^{-1}$  e  $400 \text{ mg L}^{-1}$ ) e sementes sem envelhecimento acelerado e sem condicionamento fisiológico como controle negativo.

Para os demais parâmetros avaliados, na condição de envelhecimento acelerado por 48 horas, o delineamento foi inteiramente casualizado, com delineamento em fatorial duplo  $+ 1$ , testando diferentes concentrações de nanotubo de carbono ( $0 \text{ mg L}^{-1}$  - hidroprime,  $100 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $200 \text{ mg L}^{-1}$  e  $400 \text{ mg L}^{-1}$ )  $\times$  2 tipos de estresse (NaCl; PEG) e sementes sem condicionamento e sem estresse como controle negativo ( $H_2O$ ).

Os dados foram submetidos à análise de variância e teste de Scott-Knott, para a comparação das médias com nível de significância de 5%, utilizando o software estatístico SISVAR 5.8. (Ferreira, 2019). Também foi realizado teste Dunnett a 5% de probabilidade para comparar as médias em relação ao controle.

### 3.8 Condução experimental

A implementação do experimento em campo foi realizada na Fazenda Restinga Grossa, localizada no município de Itai/SP, em março de 2024. As coordenadas geográficas do local são: latitude 23°33' S, longitude 49°04' W e altitude de 654 metros. A temperatura média anual na área é de aproximadamente 22,9 °C, e a precipitação total registrada durante o período experimental foi de 173 mm, conforme apresentado na tabela a seguir.

Tabela 1 - Dados da análise química do solo da área experimental.

pH	g.dm <sup>-3</sup>		Cmolc.dm <sup>-3</sup>							mg.dm <sup>-3</sup>				
	M.O	P <sub>resina</sub>	S	CTC	Al	H <sup>+</sup>	Ca	Mg	K	B	Cu	Fe	Mn	Zn
5,7	31,7	11,1	9,6	11,3	0,1	2,4	5,4	1,7	0,6	0,4	1,4	19,3	14,1	3,9

Fonte: elaboração própria.

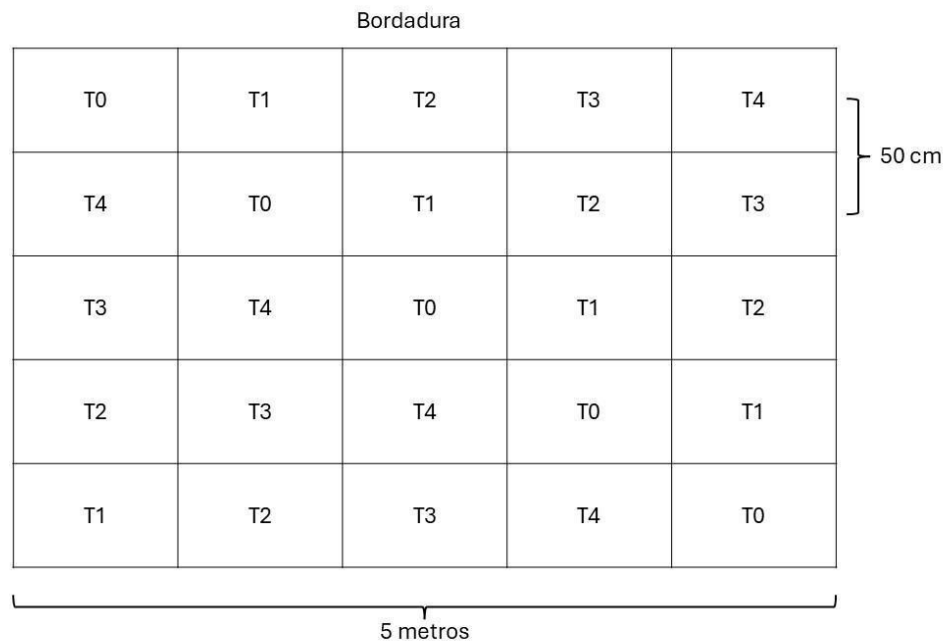
As sementes de girassol ornamental, cultivar *Vincent's Choice*, foram submetidas a condicionamento fisiológico por 2 horas em cinco tratamentos: sem condicionamento (T0), hidrocondicionamento (T1) e nanopriming com MWCNTs, nas concentrações de 100 mg L<sup>-1</sup> (T2), 200 mg L<sup>-1</sup> (T3) e 400 mg L<sup>-1</sup> (T4), seguidos de secagem (Rodrigues *et al.*, 2013).

Cada tratamento teve cinco repetições com dez sementes cada. Após o condicionamento, as sementes foram semeadas em campo e irrigadas por aspersão, com aplicação de lâmina de 10 mm a cada 48 horas. Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, em canteiros de 5 metros de comprimento, com espaçamento de 50 cm entre linhas. Para minimizar os efeitos de borda, utilizaram-se duas linhas adicionais nas extremidades dos canteiros.

Cada parcela foi composta por 10 sementes, sendo os tratamentos definidos da seguinte forma:

- T0:** Sem condicionamento e sem aplicação de nanotubos de carbono;
- T1:** Com condicionamento hídrico, sem aplicação de nanotubos;
- T2:** Condicionamento com MWCNTs a 100 mg L<sup>-1</sup>;
- T3:** Condicionamento com MWCNTs a 200 mg L<sup>-1</sup>;
- T4:** Condicionamento com MWCNTs a 400 mg L<sup>-1</sup>.

Figura 3 - Desenho experimental da disposição das plantas em campo.



Fonte: elaboração própria.

### 3.9 Crescimento inicial

Para os parâmetros de crescimento inicial, as plântulas foram avaliadas com 7, 14 e 21 dias, após emergência em relação à altura das plântulas, com auxílio de trena e diâmetro com paquímetro digital. Nessas mesmas avaliações, as plântulas foram fotografadas e mensurados os parâmetros de número de folhas e área foliar pelo programa AxionVision 4.8.

Aos 21 dias, foram coletadas amostras, para a avaliação do comprimento radicular, comprimento da parte aérea e massa fresca das mesmas plantas que haviam sido avaliadas anteriormente aos sete e 14 dias.

### 3.10 Parâmetros colorimétricos

Aos sete, 14 e 21 dias, as folhas de girassol semeadas em campo submetidas às diferentes concentrações de MWCNTs foram fotografadas e analisadas no software Adobe para a avaliação dos parâmetros colorimétricos LAB das folhas cotiledonares. Foram mensurados os parâmetros  $a^*$  (adimensional) referente aos comprimentos de onda das cores vermelha (valores positivos) e verde (valores negativos);  $b^*$  (adimensional) referente aos comprimentos

de onda das cores amarela (valores positivos) e azul (valores negativos);  $L^*$  (adimensional) que se refere à luminosidade da amostra (quanto mais positivo, mais clara é a amostra; quanto mais negativo, mais escura) (Cunha Neto *et al.*, 2024).

### **3.11 Desenvolvimento final**

Para os parâmetros de desenvolvimento final, todas as plantas foram avaliadas aos 70 dias após a semeadura, considerando que a cultivar utilizada possui ciclo de 50 a 60 dias. Foram analisados o comprimento e o volume radicular, utilizando o programa WinRHIZO, bem como a massa fresca das raízes, determinada em balança analítica. Além disso, foram avaliados o comprimento e a massa fresca da parte aérea e o diâmetro do capítulo.

### **3.12 Delineamento experimental e análises estatísticas**

O experimento foi conduzido, em delineamento em blocos casualizados, com esquema fatorial simples, testando diferentes concentrações de MWCNTs ( $100 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $200 \text{ mg L}^{-1}$  e  $400 \text{ mg L}^{-1}$ ), além do hidrocondicionamento e das sementes sem condicionamento (controle negativo). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância, utilizando o software estatístico SISVAR 5.8 (Ferreira, 2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Experimento 1 - Nanopriming de sementes de girassol com nanotubos de carbono de paredes múltiplas e envelhecimento acelerado

Os resultados mostraram que não houve interação significativa entre os fatores envelhecimento acelerado e condicionamento fisiológico com MWCNTs para germinação das sementes de girassol. Para esse parâmetro, apenas o envelhecimento acelerado teve diferença estatística sendo o tratamento com 72 horas inferior aos demais com 89% de sementes germinadas. Os demais tratamentos (0 horas, 24 horas e 48 horas) não diferiram entre si com média de 95% de germinação das sementes de girassol (Figura 4A).

O teste de envelhecimento acelerado consiste em submeter as sementes a condições de estresse controlado, como alta temperatura e umidade, para avaliar sua longevidade e qualidade. Sementes de alto vigor apresentam maior capacidade de tolerar essas condições adversas e tendem a demorar mais tempo para se deteriorar (Fenollosa *et al.*, 2020; Kata; Bhaskaran; Umarani, 2014). Nadarajan *et al.* (2023) destacam que, além desses fatores, o acúmulo de metabólitos tóxicos é um dos principais agentes que promovem o envelhecimento das sementes, o que resulta em uma redução significativa da taxa de germinação, como observado após 72 horas de envelhecimento acelerado.

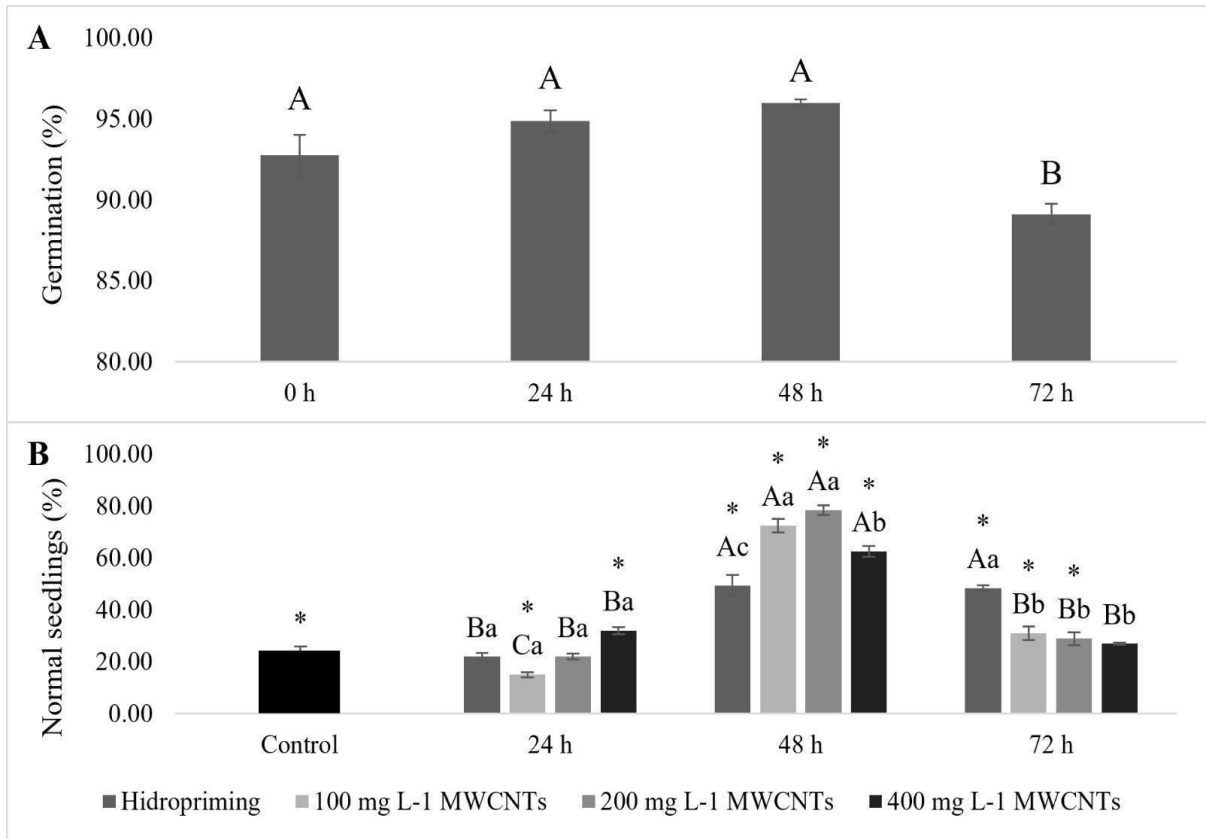
Ao contrário do observado para a porcentagem de germinação, a interação entre os fatores foi significativa para a porcentagem de plântulas normais. Ao comparar as sementes do grupo controle (sem envelhecimento acelerado e sem condicionamento fisiológico) com os demais tratamentos, observou-se uma maior porcentagem de plântulas normais nas sementes expostas a 48 horas de envelhecimento acelerado. Dentro dessa condição, as sementes tratadas com concentrações de 100 mg L<sup>-1</sup> e 200 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs (nanotubos de carbono de paredes múltiplas) mostraram um desempenho superior, em relação aos outros tratamentos, indicando assim um resultado positivo da aplicação de nanotubos de carbono.

Além disso, destaca-se que a porcentagem de plântulas normais, após o hidrocondicionamento e envelhecimento acelerado, por 48 horas e 72 horas, não diferiu significativamente entre si e foi superior à observada no grupo controle e nas sementes com 24 horas de envelhecimento acelerado. No entanto, sob a condição de 72 horas de envelhecimento acelerado, ao contrário do observado para 48 horas de envelhecimento acelerado, a presença de MWCNTs reduziu a porcentagem de plântulas normais (Figura 4B).

Os MWCNTs possuem a capacidade de penetrar nas sementes, criando "nanoespaços" que permitem o transporte, em pequena escala, de água e nutrientes por meio da parede celular e da membrana plasmática, seja por canais iônicos ou via endocitose (Luo *et al.*, 2022). Além disso, esses nanotubos estimulam a expressão de genes relacionados às aquaporinas, proteínas que facilitam o transporte de água para o interior das células (Martínez-Ballesta *et al.*, 2020).

Os canais dos nanotubos de carbono são hidrofóbicos, extremamente estreitos e estabilizados por ligações de hidrogênio. Essas características promovem maior movimentação das moléculas de água, aumentando a velocidade de sua absorção e impulsionando o crescimento e desenvolvimento vegetal (Tiwari; Dasgupta-Schubert; Villaseñor, 2023). A eficácia dos MWCNTs foi observada principalmente após 48 horas de envelhecimento acelerado. No entanto, em períodos mais prolongados, os nanotubos de carbono não foram eficazes na mitigação dos danos provocados pelo acúmulo de metabólitos tóxicos sob condições de estresse. Observou-se que, no teste realizado após 72 horas, os MWCNTs podem ter apresentado efeito tóxico às plantas, uma vez que todos os tratamentos com nanotubos resultaram em uma menor porcentagem de plântulas normais em comparação ao hidropriming nesse mesmo intervalo.

Figura 4 - (A) Porcentagem de germinação de sementes de girassol em diferentes tempos de envelhecimento acelerado. (B) Porcentagem de plântulas normais de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono em diferentes tempos de envelhecimento acelerado.



Legenda: Letras iguais não diferem estatisticamente entre si para o teste de Skott-Knott a 5% de significância - Letras maiúsculas comparam entre os tempos de envelhecimento acelerado e minúsculas comparam o condicionamento com nanotubos e \*difere do controle para os tratamentos pelo teste de Dunnet a 5% de significância.

Fonte: elaboração própria.

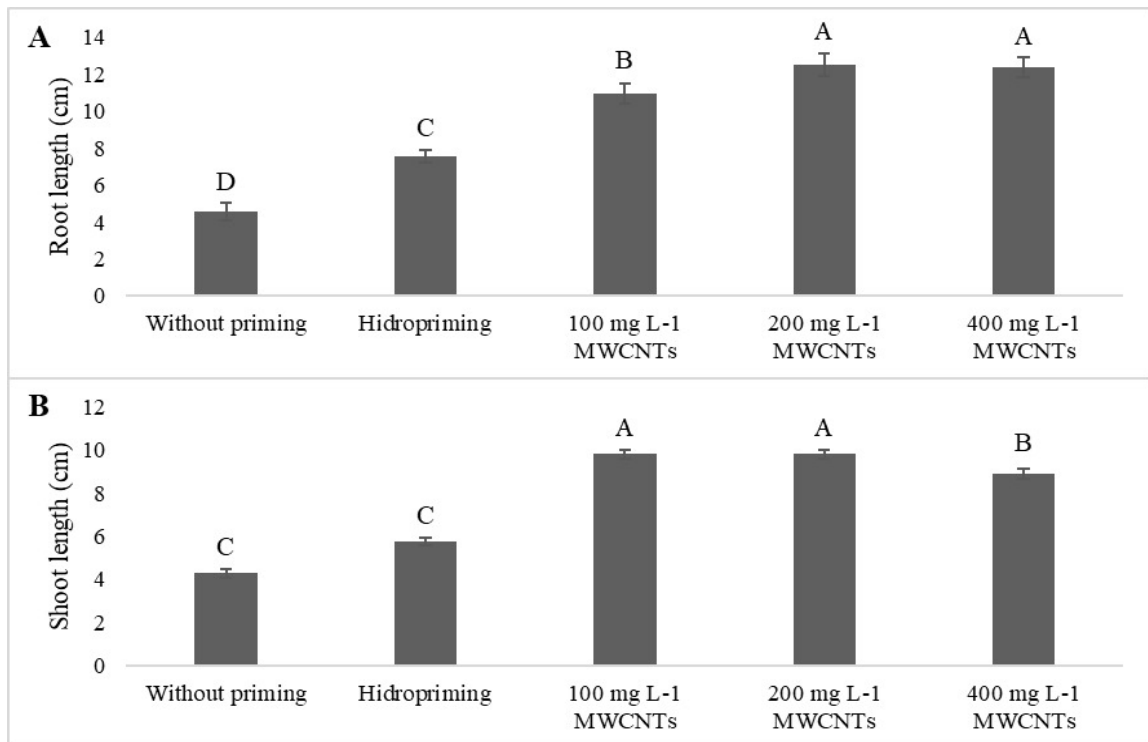
Com base nos resultados anteriores, foi determinado que a melhor condição de envelhecimento acelerado para as sementes de girassol foi de 48 horas com base no parâmetro avaliado de plântulas normais. Portanto as avaliações subsequentes focaram na comparação das diferentes concentrações de nanotubos de carbono dentro desse período de 48 horas. Nessas avaliações, foram medidos o comprimento radicular e o comprimento da parte aérea das plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono.

Observa-se que os tratamentos com 200 mg L<sup>-1</sup> e 400 mg L<sup>-1</sup> apresentaram os maiores desenvolvimentos de raiz, seguidos pela concentração de 100 mg L<sup>-1</sup>. O hidropriming apresentou valor inferior aos tratamentos com nanotubos de carbono e superior às sementes sem condicionamento (Figura 5A). Por outro lado, no comprimento da parte aérea das plântulas de girassol (Figura 5B), as concentrações de nanotubos de carbono de 100 mg L<sup>-1</sup> e 200 mg L-

<sup>1</sup> apresentaram os melhores resultados, seguidas pelo tratamento com 400 mg L<sup>-1</sup>. Os tratamentos com hidropriming e sem condicionamento fisiológico também mostraram os menores comprimentos de parte aérea em relação aos tratamentos com nanotubos de carbono. Também é possível visualizar o tamanho da parte aérea e raízes pelas fotos (Figura 6A e 6B).

O aumento da eficiência, na absorção e transporte de água, promovido pelos nanotubos de carbono, potencializa o crescimento do sistema radicular e da parte aérea das plântulas. Joshi *et al.* (2020) relataram que os nanotubos de carbono intensificam as atividades enzimáticas, influenciando diretamente o crescimento vegetal. Sob condições de envelhecimento acelerado por 48 horas, a concentração de 200 mg L<sup>-1</sup> de MWCNT foi identificada como ideal para otimizar esses parâmetros, como observado por Barroso *et al.* (2024) em plântulas de *Clitoria ternatea* L. Esses resultados evidenciam o potencial benéfico dos nanotubos de carbono no desenvolvimento vegetal e sua aplicação promissora na agricultura.

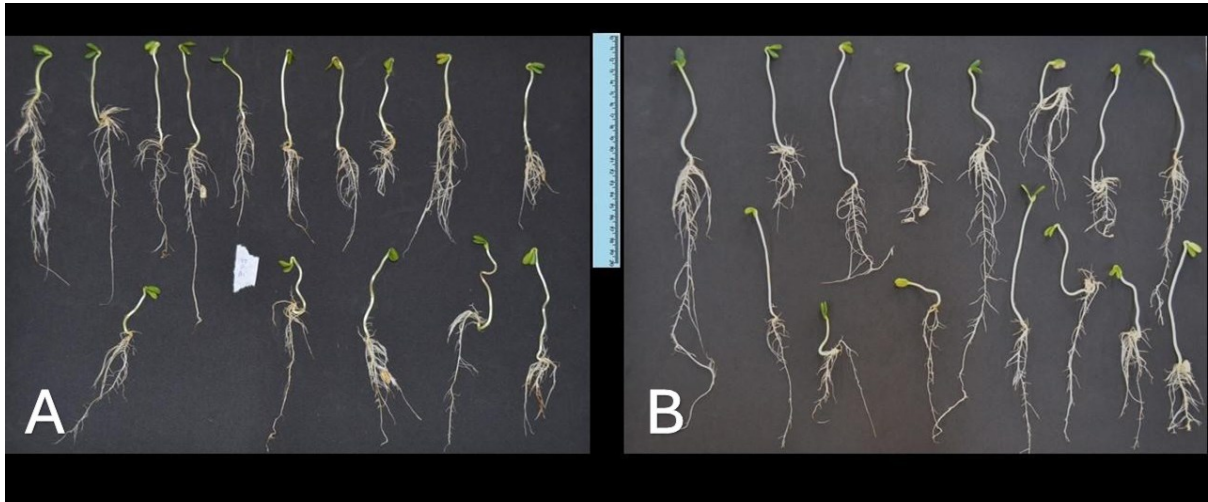
Figura 5 - (A) Comprimento radicular de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (B) Comprimento de parte aérea de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado.



Legenda: Letras iguais não diferem estatisticamente entre si para o teste de Skott-Knott a 5% de significância.

Fonte: elaboração própria.

Figura 6 - Comparação entre plântulas de girassol sem exposição a nanotubos de carbono após 48 horas de envelhecimento acelerado (A) e plântulas expostas a 200 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono (B) sob as mesmas condições de envelhecimento acelerado (48 horas).



Fonte: elaboração própria.

Ao analisar os parâmetros colorimétricos das plântulas de girassol expostas ao nanotubo, observou-se que não houve diferença para o parâmetro L\* que se refere à luminosidade da amostra. Dessa forma, independente do tratamento, as plântulas de girassol apresentaram valor de 48,34 (adimensional) para esse parâmetro. Já para o parâmetro a\*, os valores obtidos foram negativos, indicando que as amostras localizam-se no espectro verde. E entre os tratamentos observaram-se os maiores valores nas plântulas com 200 e 400 mg L<sup>-1</sup> (Figuras 7A). A redução dos valores do parâmetro a\* indica a mudança do espectro verde em direção ao amarelo-vermelho, porém somente pertencerá a esse novo espectro caso a\* seja positivo. A mudança do tom de verde das plântulas reflete o comportamento dos pigmentos foliares.

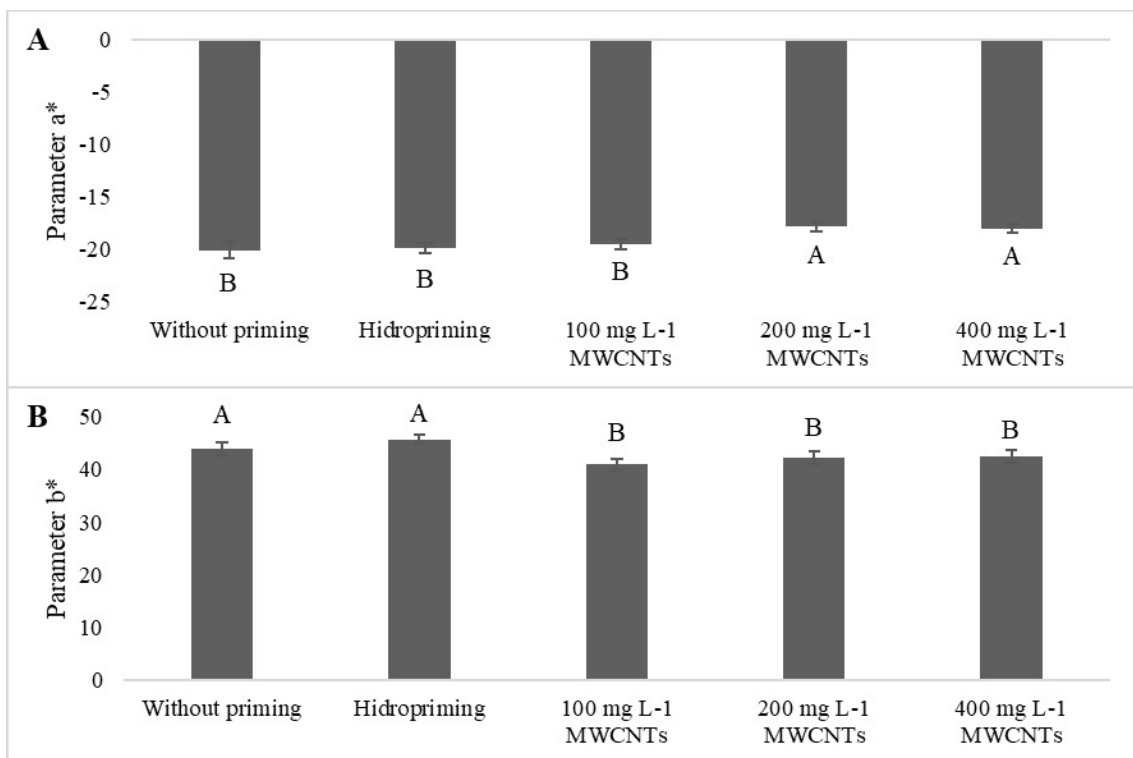
Para o parâmetro b\*, os valores obtidos foram positivos, indicando a localização no espectro amarelo. Para esse parâmetro, destaca-se o uso dos nanotubos de carbono independente da concentração os quais reduziram os valores de b\*, quando comparados com o hidrocondicionamento e às plântulas que não passaram por condicionamento fisiológico (Figura 7B). Tal redução mostra uma leve mudança na tonalidade amarela em direção ao espectro azul.

O aumento do valor de a\* e a redução do valor de b\*, na presença de nanotubos de carbono, indicam uma sutil degradação da clorofila, acompanhada da síntese de outros pigmentos, como carotenoides e xantofilas (Rodríguez *et al.*, 2008). Essa alteração resulta em plântulas com tonalidades menos verdes, mais amareladas e com um leve tom azulado. Xu *et*

*al.* (2023) também observaram um aumento significativo na síntese de diferentes xantofilas em plântulas de arroz tratadas com 200 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs, reforçando a influência desses nanomateriais na modulação do perfil de pigmentos vegetais.

A síntese e degradação de pigmentos, em resposta à ação desses nanotubos, varia conforme a concentração e a espécie vegetal. Em plântulas de arroz tratadas com 200 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs, foi observado um aumento na concentração de clorofila, sem alterações significativas nos carotenoides (Zhang *et al.*, 2017). Já em tratamentos com concentrações superiores, como 250 mg L<sup>-1</sup>, houve intensificação na produção de β-caroteno, responsável pelas tonalidades amarela e laranja, e de clorofila *b* em plântulas de tomate (Sigala-Aguilar *et al.*, 2024). Em contraste, estudos em milho revelaram que altas concentrações de MWCNTs podem induzir a formação de espécies reativas de oxigênio (EROS), ocasionando dano oxidativo aos cloroplastos e comprometendo a produção de clorofila *a* (Hu *et al.*, 2021). Esses resultados destacam a importância de ajustar as concentrações de MWCNTs de acordo com a espécie e o objetivo agrônômico.

Figura 7 - (A) Parâmetro a\* de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (B) Parâmetro b\* de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado.



Legenda: Barras representam o erro padrão. Letras iguais não diferem estatisticamente para o teste de Skott-Knott a 5% de significância.

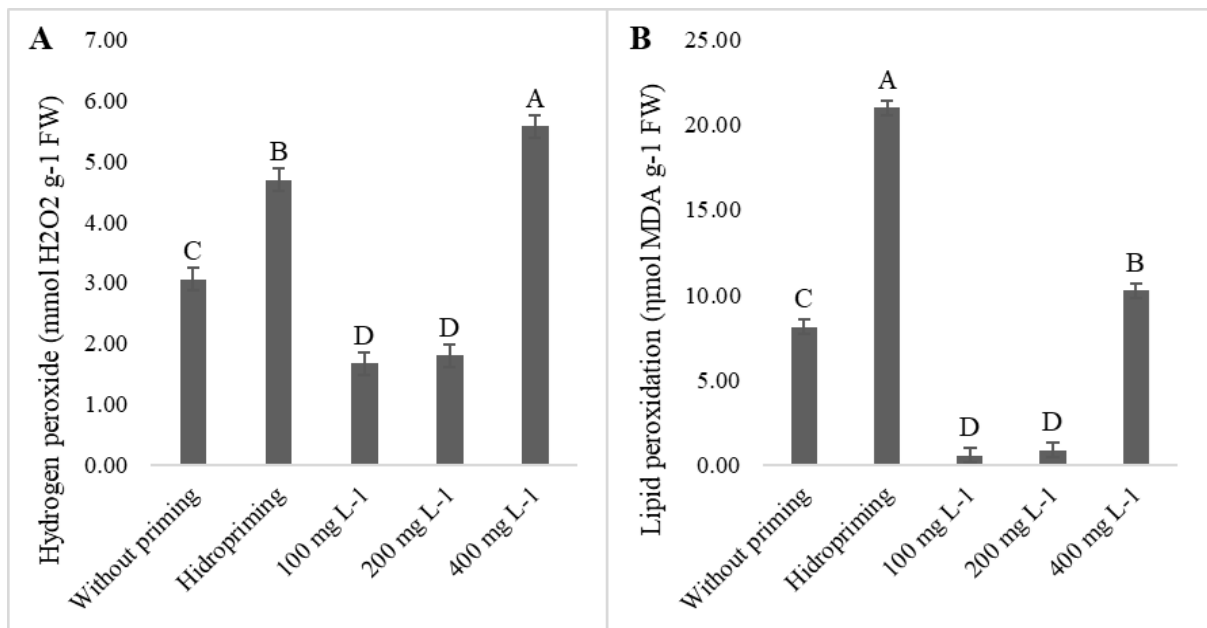
Fonte: elaboração própria.

As plântulas expostas ao condicionamento fisiológico com 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono produziram menor conteúdo de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) quando comparado com os demais tratamentos. Na maior concentração testada, 400 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono, houve maior expressão de (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), indicando que concentrações elevadas promovem a produção de espécies reativas de oxigênio (Figura 8A). Resultado semelhante foi observado para o parâmetro de peroxidação lipídica, cujos melhores resultados também foram observados nos tratamentos de 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono (Figura 8B).

Szőllósi *et al.* (2020) sugerem que altas concentrações de MWCNTs podem induzir estresse oxidativo, evidenciado pela elevada concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e pela peroxidação lipídica moderada nas amostras expostas à concentração máxima de nanotubos deste trabalho.

Além disso, as EROS também atuam como sinalizadores positivos no processo de quebra de dormência das sementes (Mezzi Ou Melzi *et al.*, 2021). Nesse contexto, espera-se que tratamentos como o hidropriming promovam maior produção de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, intensifiquem a peroxidação lipídica e aumentem a atividade de enzimas redutoras. Essa técnica é especialmente relevante por estimular o sistema antioxidante, contribuindo para a melhoria da qualidade fisiológica das sementes (Gupta *et al.*, 2022).

Figura 8 - (A) Peróxido de hidrogênio de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (B) Peroxidação lipídica de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado.



Legenda: Barras representam o erro padrão. Letras iguais não diferem estatisticamente para o teste de Skott-Knott a 5% de significância.

Fonte: elaboração própria.

O tratamento com hidropriming apresentou a maior atividade da enzima superóxido dismutase (SOD), sendo significativamente superior aos demais tratamentos (Figura 9A). Os tratamentos com 100 mg L<sup>-1</sup> e 400 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono também resultaram em atividades de SOD significativamente altas, porém não diferindo estatisticamente das semente-controle. Em contraste, o tratamento com 200 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono apresentou a menor atividade de SOD, sendo significativamente inferior aos demais tratamentos. A SOD, predominantemente localizada nas mitocôndrias, é responsável por catalisar a conversão do radical superóxido em peróxido de hidrogênio, desempenhando um papel essencial à tolerância das plantas a diferentes tipos de estresses (Stephenie *et al.*, 2020).

Para a catalase (CAT), o tratamento com 400 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono também apresentou uma atividade relativamente alta, mas significativamente inferior ao hidropriming (Figura 9B). Os tratamentos sem condicionamento fisiológico, com 100 mg L<sup>-1</sup> e 200 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono, exibiram as menores atividades de CAT, sem diferenças significativas entre eles e ambos inferiores aos tratamentos com hidropriming.

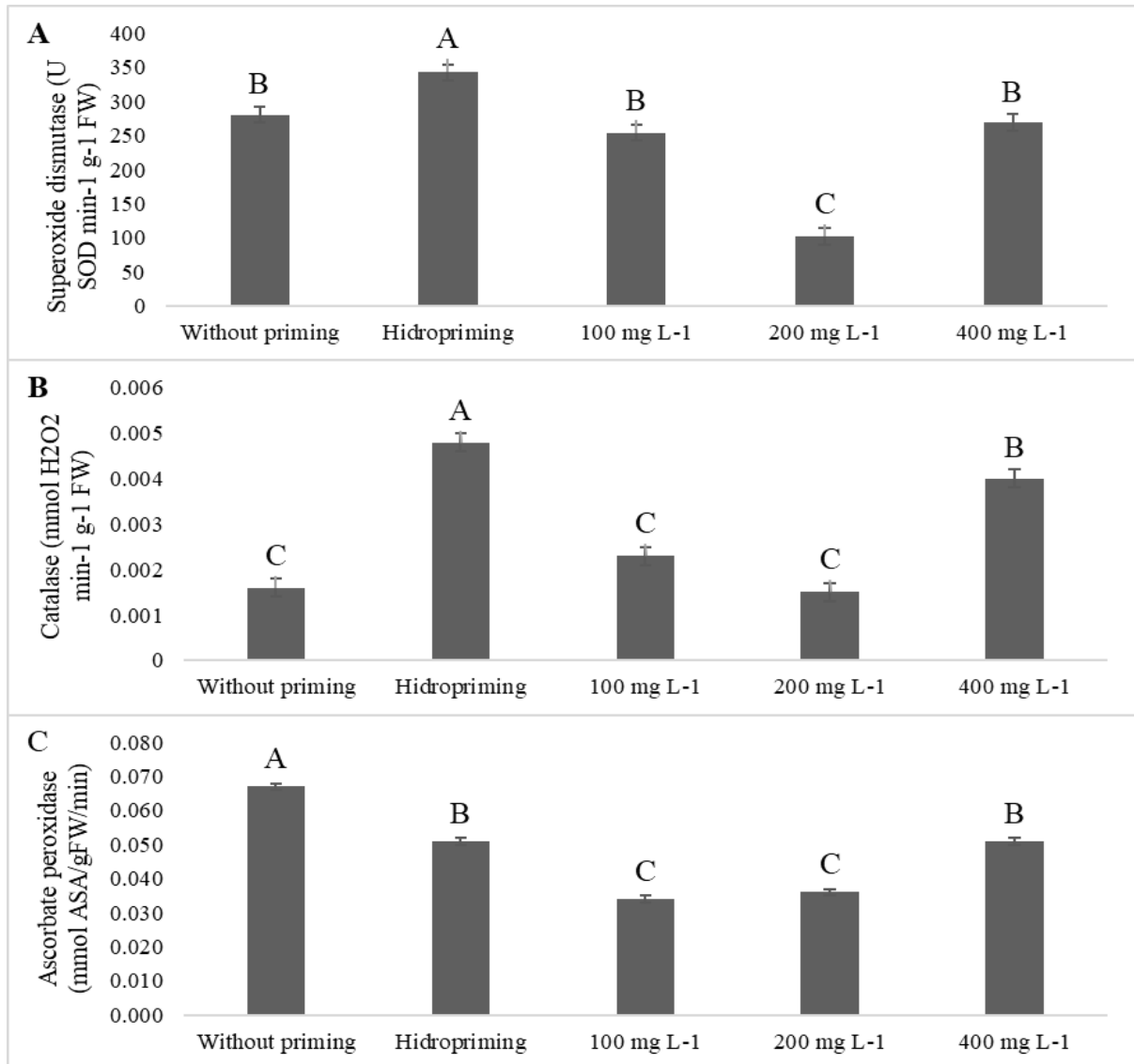
Em tratamentos com hidropriming, o aumento na concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e na peroxidação lipídica foi acompanhado por uma elevação na atividade de SOD e catalase (CAT), atuando para minimizar os efeitos do estresse oxidativo. Para o milho, Chen *et al.* (2021) identificaram que a concentração ideal de MWCNTs, para reduzir a atividade de SOD, é 200 mg L<sup>-1</sup>. A CAT é encontrada principalmente nos peroxissomos e, além de converter H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em água e O<sub>2</sub>, é importante para desencadear a senescência da planta, em que há redução das atividades das enzimas antioxidantes para que haja acúmulo de EROS (Baker *et al.*, 2023). Além disso, a catalase desempenha um papel crucial na defesa das plantas, contribuindo para o fortalecimento do sistema imunológico e mitigando os danos causados pelas espécies reativas de oxigênio (EROs) geradas durante a interação com microrganismos patogênicos (Riseh *et al.*, 2024).

Em plântulas de milhetos, concentrações acima de 90 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs deflagraram aumento na síntese de peroxidase, CAT e SOD (Sharma *et al.*, 2023). Neste estudo, o aumento de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no hidropriming (em relação ao tratamento sem priming) foi acompanhado pelo aumento de SOD e CAT para responder ao estresse oxidativo. Dessa forma, os nanotubos também podem ser considerados reguladores de enzimas do sistema antioxidante (Samadi *et al.*, 2020). Em plantas do gênero *Arabidopsis*, constatou-se que o acúmulo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é capaz de induzir a ativação de canais de cálcio e fechamento dos estômatos para garantir a homeostase celular (Sun *et al.*, 2020).

O tratamento sem priming apresentou a maior atividade de ascorbato peroxidase, sendo significativamente superior aos outros tratamentos (Figura 9C). Os tratamentos com 100 mg L<sup>-1</sup> e 200 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono apresentaram as menores atividades de APX, sem diferenças significativas entre eles. O tratamento com 400 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono resultou em uma atividade de APX significativamente maior que os tratamentos com 100 mg L<sup>-1</sup> e 200 mg L<sup>-1</sup>, mas igual ao hidropriming e inferior ao tratamento sem priming.

O ciclo ascorbato-glutationa desempenha um papel fundamental no sistema antioxidante das plantas. Nesse ciclo, o ascorbato é catalisado pela enzima APX, sendo convertido em monodeidroascorbato (MDHA) enquanto reduz o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Paralelamente, o ciclo da glutaciona regenera o ascorbato, permitindo a manutenção do sistema antioxidante e a redução da atividade oxidativa das EROs (Jiang *et al.*, 2022).

Figura 9 - Plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado (A) Superóxido dismutase de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (B) Catalase de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado. (C) Ascorbato peroxidase de plântulas de girassol expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono com 48 horas de envelhecimento acelerado.



Legenda: Letras iguais não diferem estatisticamente entre si para o teste de Skott-Knott a 5% de significância.

Fonte: elaboração própria.

Neste estudo, ao comparar o tratamento 200 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos com o controle negativo (sem priming), observou-se uma redução na concentração de peróxidos gerados, sem aumento na atividade enzimática da SOD, CAT e APX. Esses resultados sugerem que os nanotubos de carbono atuam por mecanismos alternativos para reduzir os níveis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

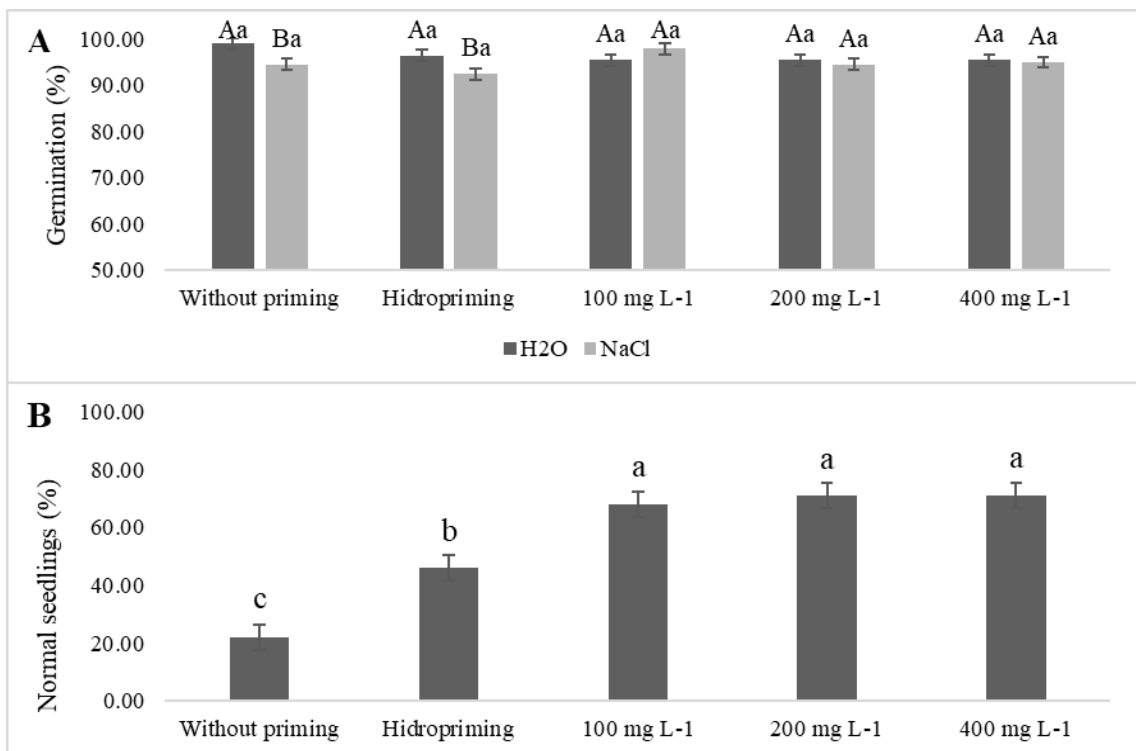
Possivelmente, os MWCNTs interagem diretamente com a produção de antioxidantes fitoquímicos capazes de neutralizar o  $H_2O_2$ , como betaína e alantoína (Pleh *et al.*, 2021).

#### 4.2 Condições de estresse

Para os resultados obtidos das análises do segundo lote de sementes de girassol, a Figura 10A mostra que os tratamentos com hidropriming e MWCNTs não diferiram significativamente quanto à germinação, tanto sob  $H_2O$  quanto sob NaCl. No entanto, sem priming ou apenas com hidropriming, a germinação foi menor sob presença de NaCl. Já nas concentrações de 100, 200 e 400  $mg L^{-1}$  de MWCNTs, não houve diferença entre as soluções, sugerindo que o nanopriming atenuou os efeitos do estresse salino.

A Figura 10B mostra diferenças significativas entre os tratamentos na porcentagem de plântulas normais sob estresse salino. O tratamento "Sem priming" apresentou a menor taxa ("c"), enquanto o "Hidropriming" resultou em um aumento significativo ("b"). Já os tratamentos com 100, 200 e 400  $mg L^{-1}$  tiveram os maiores valores, sem diferenças entre eles.

Figura 10 - (A) Taxa de germinação entre os tratamentos com água e cloreto de sódio (NaCl) e entre as diferentes concentrações de nanotubos de carbono.

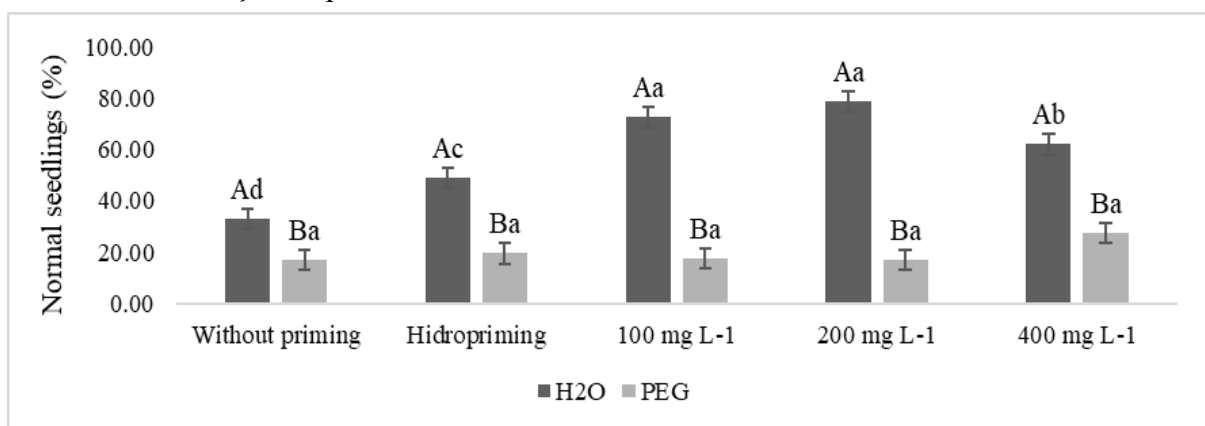


Legenda: Letras maiúsculas comparam  $H_2O$  com NaCl e minúsculas entre as concentrações. (B) Porcentagem de plântulas normais expostas a diferentes concentrações de nanotubos de carbono. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância.

Fonte: elaboração própria.

A porcentagem de plântulas normais foi significativamente reduzida sob estresse hídrico (PEG), em comparação à condição controle (H<sub>2</sub>O), destacando os impactos negativos do déficit hídrico no desenvolvimento inicial (Figura 11). O tratamento sem priming apresentou as menores taxas de plântulas normais, embora os tratamentos com priming tenham favorecido o crescimento sob H<sub>2</sub>O — especialmente nas concentrações de 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs — nenhum foi capaz de reverter os efeitos do estresse sob PEG. O hidropriming teve desempenho intermediário, e a concentração de 400 mg L<sup>-1</sup> mostrou leve redução na eficiência. Assim, ainda que a germinação tenha sido semelhante entre os tratamentos, os resultados indicam que o nanopriming com 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> pode beneficiar o desenvolvimento inicial das plântulas em condições não estressantes.

Figura 11 - Porcentagem de plântulas normais sob diferentes tratamentos de priming e estresse hídrico (H<sub>2</sub>O vs. PEG). A germinação não apresentou diferenças entre os tratamentos, mantendo-se em 95%. No entanto houve diferenças significativas na formação de plântulas normais.



Legenda: Letra maiúscula compara água com PEG; letra minúscula comparada entre as concentrações.

Fonte: elaboração própria.

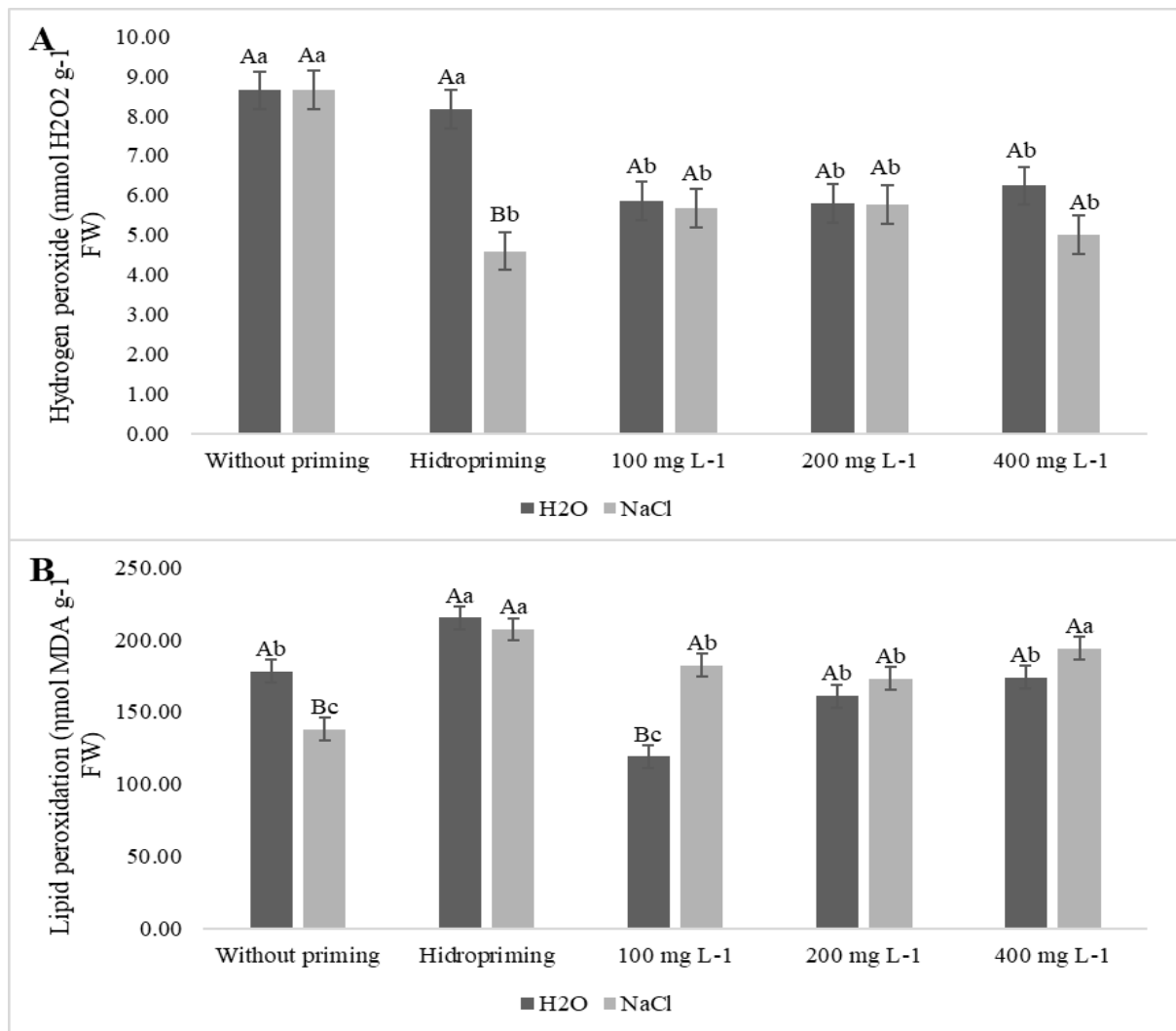
Na utilização apenas de água, os tratamentos com 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> tiveram os melhores resultados, enquanto 400 mg L<sup>-1</sup> apresentaram uma leve redução. O hidropriming teve desempenho intermediário. Assim, embora a germinação tenha sido semelhante entre os tratamentos, o PEG afetou negativamente o desenvolvimento de plântulas normais não sendo positivo em nenhum tratamento, enquanto o priming com 100 e 200 mg L<sup>-1</sup> favoreceu o crescimento sob condições sem estresse.

Nas análises bioquímicas, avaliou-se o impacto de diferentes tratamentos de priming na concentração de peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica (Figuras 12A e 12B) sob condições de H<sub>2</sub>O e NaCl. O peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) apresentou os maiores níveis no tratamento sem priming, sem distinção entre H<sub>2</sub>O e NaCl. O hidropriming reduziu

significativamente a concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  sob NaCl, mas não teve efeito sob  $\text{H}_2\text{O}$ . Já os tratamentos com 100, 200 e 400  $\text{mg L}^{-1}$  diminuíram os níveis de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , em comparação ao sem priming, sem diferenças entre  $\text{H}_2\text{O}$  e NaCl, sugerindo que o priming contribuiu para a redução do estresse oxidativo.

A peroxidação lipídica foi elevada no tratamento sem priming, com menor valor sob NaCl que sob  $\text{H}_2\text{O}$ . O hidropriming manteve altos níveis de MDA, sem diferenças entre  $\text{H}_2\text{O}$  e NaCl. O tratamento com 100  $\text{mg L}^{-1}$  reduziu significativamente a peroxidação lipídica sob  $\text{H}_2\text{O}$ , mas permaneceu elevado sob NaCl. Já os tratamentos com 200 e 400  $\text{mg L}^{-1}$  apresentaram níveis intermediários de MDA, sem diferenças significativas entre  $\text{H}_2\text{O}$  e NaCl.

Figura 12 - (A) Concentração de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e (B) peroxidação lipídica (MDA) em plântulas submetidas a diferentes tratamentos de priming e condições de estresse salino (NaCl).

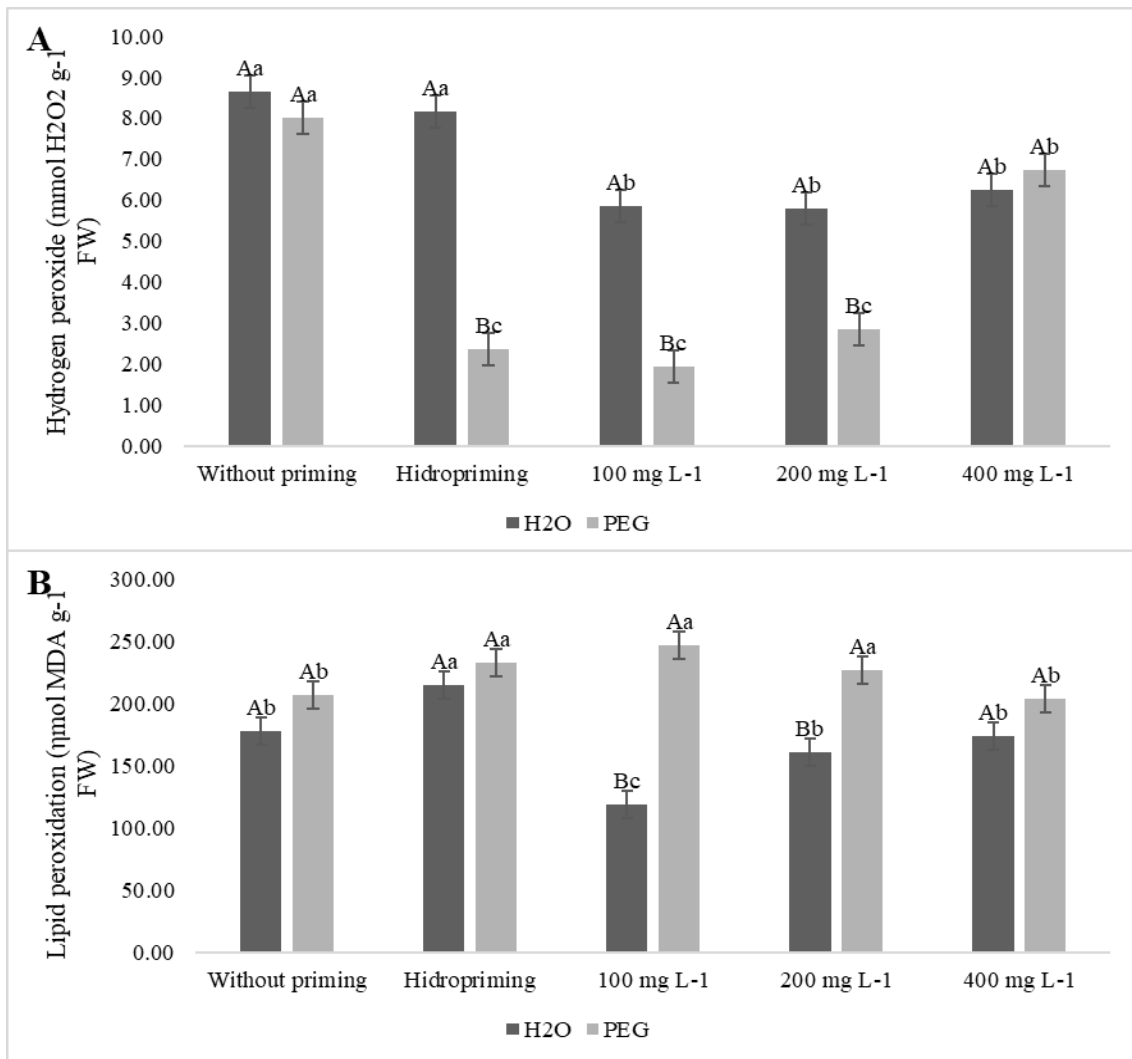


Legenda: Letras maiúsculas comparam  $\text{H}_2\text{O}$  e NaCl, dentro de cada tratamento, enquanto letras minúsculas comparam os tratamentos entre si. Os valores representam a média  $\pm$  erro padrão.

Fonte: elaboração própria.

A Figura 13 demonstra que o nanopriming com MWCNTs, especialmente nas concentrações de 100 e 200 mg L<sup>-1</sup>, foi eficaz na mitigação do estresse oxidativo em plântulas de girassol sob PEG, reduzindo significativamente os níveis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e MDA. A dose de 100 mg L<sup>-1</sup> destacou-se, na redução da peroxidação lipídica sob condições sem estresse, enquanto a concentração de 400 mg L<sup>-1</sup> não apresentou os mesmos benefícios, sugerindo que doses mais elevadas podem comprometer a eficácia do tratamento. Esses achados evidenciam o potencial dos MWCNTs como ferramenta promissora, no manejo de estresses abióticos, desde que utilizados em concentrações adequadas.

Figura 13 - (A) Níveis de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e (B) peroxidação lipídica (MDA) sob diferentes tratamentos de priming (sem priming, hidropriming e concentrações de 100, 200 e 400 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs).



Letras maiúsculas comparam H<sub>2</sub>O e PEG dentro de cada tratamento, enquanto letras minúsculas comparam os tratamentos entre si. Os valores representam a média ± erro padrão ( $p < 0,05$ ).

Fonte: elaboração própria.

### 4.3 Experimento 2 - Nanopriming de sementes de girassol com nanotubos de carbono de paredes e seu desenvolvimento em campo

No experimento conduzido em campo, observou-se o estabelecimento das plântulas de girassol e seu desenvolvimento vegetativo inicial. As avaliações foram realizadas ao longo de todo o ciclo da cultura, considerando diferentes estágios de desenvolvimento.

Figura 14 - Girassol em campo, após 50 dias de cultivo, proveniente de sementes tratadas com diferentes concentrações de nanotubos de carbono.



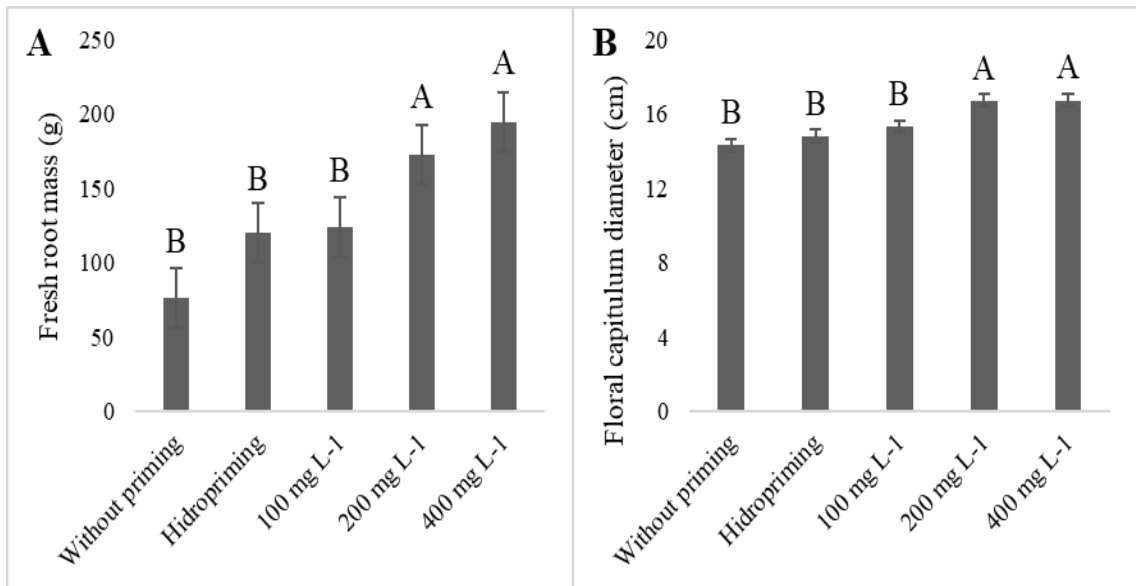
Fonte: imagem da autora.

O desenvolvimento inicial e as análises colorimétricas não diferiram estatisticamente nos diferentes tratamentos. Apenas após 70 dias do cultivo das sementes de girassol submetidas ao condicionamento fisiológico com MWCNTs, constatou-se diferença em alguns parâmetros. Para o comprimento de raiz não houve diferença estatística com média de  $18,18 \pm 1,37$  cm. Já para o parâmetro de massa fresca da raiz houve diferença estatística, sendo os melhores tratamentos, as sementes condicionadas em solução de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  e  $400 \text{ mg L}^{-1}$  de MWCNTs com pesos de 172 g e 194 g, respectivamente (Figura 15).

Ao medir os parâmetros morfológicos de parte aérea, eles não diferiram estatisticamente para o comprimento e tiveram uma média de  $152,44 \pm 4,11$  cm e para a massa fresca com peso médio de  $610 \pm 70$  g. O mesmo ocorreu para o comprimento total e massa fresca total de

girassol, sendo o tamanho médio das plantas de  $170,91 \pm 4,57$  cm e peso médio das plantas de  $752 \pm 90$  g.

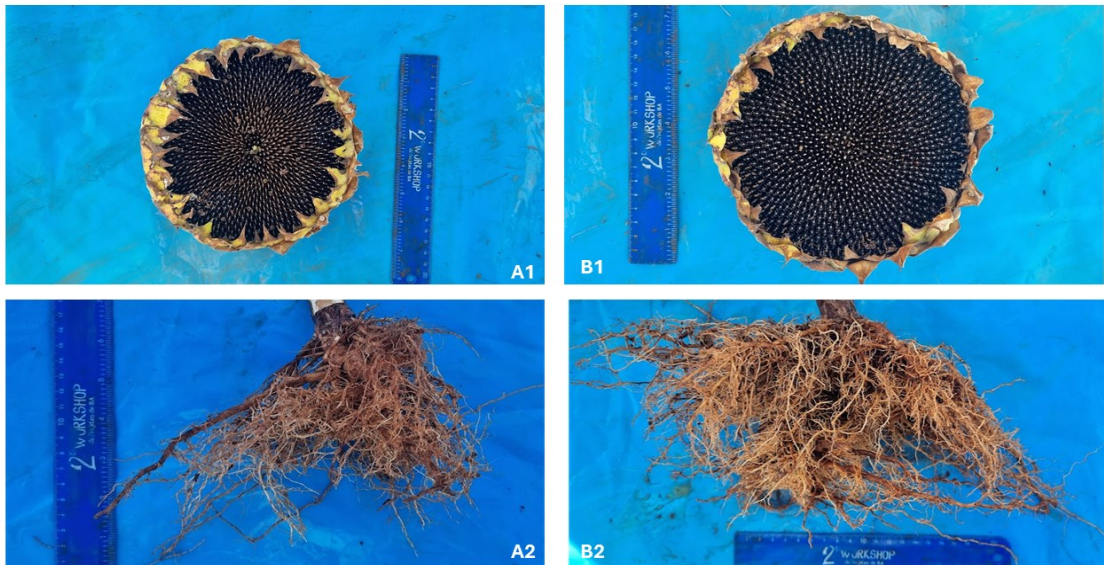
Figura 15 - (A) Massa fresca de raiz e (B) diâmetro do capítulo floral de girassol com 70 dias expostas ao condicionamento fisiológico com diferentes concentrações de nanotubos de carbono.



Fonte: elaboração própria.

Em relação ao diâmetro do capítulo, as maiores contrações de MWCNTs (200 mg L<sup>-1</sup> e 400 mg L<sup>-1</sup>) diferiram estatisticamente de forma superior das demais com média de 16,71 cm (Figura 15B). A aplicação dos nanotubos com concentração de 200 mg L<sup>-1</sup> acarretou aumento do diâmetro do capítulo e aumento do volume das raízes como pode ser observado na Figura 16. O capítulo maior pode indicar aumento da produtividade de sementes, beneficiando o agricultor (Oliveira *et al.*, 2022).

Figura 16 - (A1, A2) Raiz e capítulo de plantas sem hidrocondicionamento, após 70 dias de plantio. (B1, B2) Raiz e capítulo de plantas tratadas com 200 mg L<sup>-1</sup> de nanotubos de carbono, após 70 dias de exposição ao condicionamento fisiológico.



Fonte: elaboração própria.

A ausência de diferença no comprimento radicular, mesmo diante do tratamento com nanotubos, pode ser atribuída a diversos fatores. O crescimento em extensão da raiz é regulado principalmente por mecanismos hormonais, especialmente pela ação de auxinas e giberelinas, e os MWCNTs, nesse caso, podem não ter exercido influência suficiente sobre tais mecanismos para alterar significativamente o alongamento celular (Darvishzadeh; Sarghin, 2020).

Por outro lado, o aumento significativo da massa fresca radicular, nos tratamentos com MWCNTs, revela que houve, sim, uma resposta fisiológica positiva à nanotecnologia, mas em outros aspectos do desenvolvimento das raízes. A massa fresca da raiz não depende apenas do comprimento da raiz principal, mas também da densidade, espessura e ramificação do sistema radicular. Portanto é possível inferir que os MWCNTs estimularam uma maior proliferação de raízes laterais, maior espessamento radicular ou aumento do conteúdo hídrico e celular das raízes. Isso promove, por exemplo, maior divisão celular nas regiões meristemáticas, maior deposição de substâncias de reserva nas células e maior capacidade de absorção e retenção de água (Zhang *et al.*, 2025).

Além disso, deve-se considerar que os MWCNTs podem atuar como facilitadores da absorção de nutrientes, especialmente de macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, os quais são fundamentais para a síntese de proteínas, ácidos nucleicos e outras moléculas essenciais ao crescimento vegetal. A maior absorção desses elementos pode ter contribuído para o aumento da massa radicular (Singh *et al.*, 2018).

A resposta positiva nas concentrações de 200 mg L<sup>-1</sup> e 400 mg L<sup>-1</sup> também indica uma relação dose-dependente entre a aplicação dos MWCNTs e a resposta fisiológica das plantas. Isso demonstra que existe uma faixa de concentração ideal para que esses nanomateriais atuem como bioestimulantes (Rahmani *et al.*, 2020).

O crescimento da parte aérea está intimamente ligado à disponibilidade de recursos, como água, nutrientes e luz, além de ser controlado por uma complexa interação hormonal envolvendo auxinas, giberelinas e citocininas. A aplicação de MWCNTs, no condicionamento fisiológico, pode ter promovido estímulos positivos ao metabolismo radicular, conforme evidenciado pelo aumento na massa fresca das raízes nos tratamentos anteriores, mas esse efeito não necessariamente se traduz, de maneira imediata ou proporcional, em crescimento da parte aérea, sobretudo em plantas anuais como o girassol, cujo ciclo vegetativo é relativamente curto e fisiologicamente definido (Hao *et al.*, 2023).

É possível, inclusive, que o incremento funcional no sistema radicular tenha favorecido a estabilidade do desenvolvimento das plantas, sem necessariamente resultar em alongamento adicional ou acúmulo significativo de biomassa aérea. Isso pode indicar um efeito estabilizador dos MWCNTs, no desenvolvimento global da planta, promovendo uniformidade e robustez estrutural (Chen *et al.*, 2021).

Por outro lado, os resultados relacionados ao diâmetro do capítulo floral, que apresentaram diferenças estatísticas significativas, nas concentrações mais elevadas de MWCNTs (200 mg L<sup>-1</sup> e 400 mg L<sup>-1</sup>), tem implicações fisiológicas e produtivas, uma vez que o capítulo é a principal estrutura reprodutiva do girassol, responsável pela produção de sementes. O aumento de seu diâmetro pode indicar maior número de flores por capítulo, maior área para produção de sementes e, conseqüentemente, potencial aumento na produtividade da cultura (Wu *et al.*, 2023).

A ação dos MWCNTs sobre o diâmetro do capítulo pode estar associada a diversos mecanismos fisiológicos: melhoria na translocação de fotoassimilados, maior eficiência na absorção e redistribuição de nutrientes (especialmente fósforo e potássio, fundamentais para o florescimento) e estímulo a vias metabólicas ligadas ao desenvolvimento floral. A maior massa radicular observada anteriormente também pode ter contribuído indiretamente para esse resultado, ao possibilitar maior absorção de água e nutrientes e melhor sustentação metabólica, durante o florescimento, fase que exige alto investimento energético por parte da planta (Singh *et al.*, 2018).

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo reforça o nanopriming com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs) como uma estratégia inovadora e promissora para a agricultura, ao demonstrar seus efeitos benéficos, em duas abordagens experimentais complementares: condições controladas de laboratório e cultivo em campo aberto.

- a) Em ambiente controlado, o tratamento com 200 mg L<sup>-1</sup> de MWCNTs destacou-se por estimular o desenvolvimento radicular, fortalecer a parte aérea e modular positivamente o sistema antioxidante das plântulas, reduzindo o estresse oxidativo, especialmente sob estresse salino;
- b) Já no experimento em campo, embora os parâmetros iniciais não tenham diferido estatisticamente entre os tratamentos, após 70 dias, as sementes tratadas com 200 e 400 mg L<sup>-1</sup> apresentaram maior massa fresca de raiz e capítulos com diâmetro superior, indicando benefícios em fases mais avançadas do cultivo.

O nanopriming com nanotubos de carbono mostra-se uma alternativa promissora, para melhorar o desempenho de culturas como o girassol, especialmente em cenários de estresse e alta demanda produtiva. No entanto os resultados também evidenciam a necessidade de cautela, já que concentrações elevadas podem intensificar o estresse oxidativo. Assim, embora os efeitos observados sejam positivos, mais estudos são necessários para compreender plenamente os mecanismos envolvidos e garantir uma aplicação segura e eficiente dessa tecnologia.

## REFERÊNCIAS

- ADETUNJI, A. E. *et al.* Oxidative stress, ageing and methods of seed invigoration: an overview and perspectives. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122369>.
- AFZAL, S. *et al.* Eco-friendly synthesis of phytochemical-capped iron oxide nanoparticles as nano-priming agent for boosting seed germination in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 28, p. 40275-40287, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12056-5>.
- ALBUQUERQUE, M. C. de F.; CARVALHO, N. M. Condicionamento fisiológico de aquênios de girassol. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1061-1066, dez. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600004>.
- ALMEIDA, B. V. B. de; SANTOS, M. G. dos; TESCAROLLO, I. L. Nanotecnologia: revisão integrativa sobre uso de nanoemulções em cosmecêuticos. **Revista Ensaios Pioneiros**, Bragança Paulista, v. 7, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.24933/rep.v7i1.291>.
- ALMEIDA, L. *et al.* Bioatividade de óleos essenciais na germinação e no vigor em sementes de tomate. **Biotemas**, Florianópolis, v. 32, n. 2, p. 13-21, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5007/2175-7925.2019v32n2p13>.
- ANDRADE, P. A. *et al.* Efeitos de nanotubos de carbono na germinação de lactuca sativa. *In*: WORKSHOP DA REDE DE NANOTECNOLOGIA APLICADA AO AGRONEGÓCIO, 9., 2017, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2017. p. 663-666.
- ANTUNES FILHO, S.; BACKX, B. P. Nanotecnologia e seus impactos na sociedade. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 16, n. 40, p. 1-15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3895/rts.v16n40.9870>.
- ARAÚJO, A. S. *et al.* Análise da fenologia do girassol *Helianthus annuus* L. variedade anão. **Diversitas Journal**, Santana do Ipanema, v. 3, n. 2, p. 184-190, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v3i2.602>.
- ARUNKUMAR, K.; JEGADEESWARI, V.; USHAMALINI, C. Seed priming technology in spice crops: a review. **Journal of Phytology**, Caparica, v. 11, p. 21-24, 2019. DOI: <https://doi.org/10.25081/jp.2019.v11.3787>.
- BADAWY, A. A. *et al.* Efficacy assessment of biosynthesized copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) on stored grain insects and their impacts on morphological and physiological traits of wheat (*Triticum Aestivum* L.). **Plant Biology**, Basel, v. 10, n. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology10030233>.
- BAKER, A. *et al.* Catalase: a critical node in the regulation of cell fate. **Free Radical Biology and Medicine**, New York, v. 199, p. 56-66, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2023.02.009>.

BARROS, T. T. *et al.* Condicionamento osmótico, ação antioxidativa e estresse térmico em sementes de girassol com diferentes níveis de vigor. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 42, n. 11, p. 1435-1452, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n3Supl1p1435>.

BARROSO, L. T. *et al.* Seed priming in *Clitoria ternatea* L. with multi-walled carbon nanotubes: a physicochemical and morphological approach. **Ornamental Horticulture**, Viçosa, MG, v. 30, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v30.e242751>.

BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, San Diego, v. 116, n. 2, p. 651-658, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.651>.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **7º levantamento da safra de grãos 2024/2025**. Brasília, DF: Conab, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 24 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 399 p.

BUEGE, J. A.; AUST, S. D. Microsomal lipid peroxidation. *In*: FLEISCHER, S.; PACKER, L. (ed.). **Methods in enzymology**. New York: Academic, 1978. p. 302-310.

CAMARGO, J. S. F.; SEMMER, A. de O.; SILVA, S. N. da. Características e aplicações do grafeno e do óxido de grafeno e as principais rotas para síntese. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, MG, v. 3, n. 8, p. 1118-1130, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18540/jcecv13iss8pp1118-1130>.

CHEN, J. *et al.* Seed Priming with Multiwall Carbon Nanotubes (MWCNTs) modulates seed germination and early growth of maize under Cadmium (Cd) toxicity. **The Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 21, p. 1793-1805, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00480-6>.

CUNHA NETO, A. R. da *et al.* Physiological effects of pulsing on torch ginger stems. **Ornamental Horticulture**, Viçosa, MG, v. 30, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v30.e242709>.

DARVISHZADEH, R.; HOSSEINI SARGHIN, S. The multi-walled carbon nanotubes induced anatomical and morphological changes in root and shoot of two cultivars of Okra (*Hibiscus esculentus* L.) seedlings. **Journal of Plant Process and Function**, Isfahan, v. 8, n. 34, p. 27-36, 2020. Disponível em: <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1143-en.html>. Acesso em: 10 nov. 2024.

DELAUX, P.; SCHORNACK, S. Plant evolution driven by interactions with symbiotic and pathogenic microbes. **Science**, New York, v. 371, n. 6531, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba6605>.

DOGRAMACI, M. *et al.* Physiological and molecular mechanisms associated with potato tuber dormancy. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 75, n. 19, p. 6093-6109, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erae182>.

EL-SANATAWY, A. M. *et al.* Seed halo-priming improves seedling vigor, grain yield, and water use efficiency of maize under varying irrigation regimes. **Water**, Gezina, v. 13, n. 15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152115>.

FENOLLOSA, E. *et al.* A rapid and sensitive method to assess seed longevity through accelerated aging in an invasive plant species. **Plant Methods**, London, v. 16, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00607-3>.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, Lavras, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. DOI: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.

FERREIRA, T. C.; PEREZ-MARIN, A. M. Priming em sementes: uma revisão bibliográfica concisa e atualizada. **BIOFIX Scientific Journal**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 27-36, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5380/biofix.v7i1.81337>.

FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 3, p. 567-591, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I., occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, Oxford, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>.

GOMES, P. M. Nanophytoremediation: advancing phytoremediation efficiency through nanotechnology integration. **Discover Plants Review**, London, v. 2, n. 8, Jan. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00090-x>.

GUPTA, N. K. *et al.* On-farm hydro and nutri-priming increases yield of rainfed pearl millet through physio-biochemical adjustments and anti-oxidative defense mechanism. **Plos One**, San Francisco, v. 17, n. 6, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265325>.

HAO, Y. *et al.* Effects of multi-walled carbon nanotubes and nano-silica on root development, leaf photosynthesis, active oxygen and nitrogen metabolism in maize. **Plants**, Basel, v. 12, n. 8, p. 1604, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12081604>.

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, Oxford, v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.84.2.450>.

HU, Y. *et al.* Multi-wall carbon nanotubes promote the growth of maize (*Zea mays*) by regulating carbon and nitrogen metabolism in leaves. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 69, n. 17, p. 4981-4991, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00733>.

HUSSAIN, A. *et al.* Seed priming with silicon nanoparticles improved the biomass and yield while reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat grains. **Environmental Science and Pollution Research**, Oxford, v. 26, p. 7579-7588, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04210-5>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TC 229:** nanotechnologies. Disponível em: <https://www.iso.org/committee/381983.html>. Acesso em: 15 mar. 2019.

JIANG, Z. *et al.* Exogenous ABA enhances the antioxidant defense system of maize by regulating the AsA-GSH cycle under drought stress. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14053071>.

JOSHI, A. *et al.* Plant nanobionic effect of multi-walled carbon nanotubes on growth, anatomy, yield and grain composition of rice. **BioNanoScience**, London, v. 10, p. 430-445, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12668-020-00725-1>.

KANDHOL, N. *et al.* Nano-priming: impression on the beginner of plant life. **Plant Stress**, Melbourne, v. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100091>.

KASOTE, D. M. *et al.* Seed priming with iron oxide nanoparticles modulate antioxidant potential and defense-linked hormones in watermelon seedlings. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, Washington, DC, v. 7, n. 5, p. 5142-5151, 2019.

KATA, L. P.; BHASKARAN, M.; UMARANI, R. Influence of priming treatments on stress tolerance during seed germination of rice. **International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology**, New Delhi, v. 7, n. 2, p. 225, 2014. DOI: 10.5958/2230-732X.2014.00238.1.

KHALAKI, A. M. *et al.* Influence of nano-priming on seed germination and plant growth of forage and medicinal plants. **Plant Growth Regulation**, Dordrecht, v. 93, p. 13-28, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00670-9>.

KAUR, N. *et al.* Effect of heat stress on antioxidative defense system and its amelioration by heat acclimation and salicylic acid pre-treatments in three pigeonpea genotypes. **Indian Journal of Agricultural Biochemistry**, New Delhi, v. 32, n. 1, p. 106-110, 2019.

KUBALA, S. *et al.* Deciphering priming-induced improvement of rapeseed (*Brassica napus* L.) germination through an integrated transcriptomic and proteomic approach. **Plant Science**, Shannon, v. 231, p. 94-113, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.11.008>.

KUMAR, V. *et al.* Environmentally benign synthesis of phytochemicals-capped gold nanoparticles as nanoprimer agent for promoting maize seed germination. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 573, p. 1201-1210, Dec. 2015. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.120.

LEE, J. H. J.; KASOTE, D. M. Nano-priming for inducing salinity tolerance, disease resistance, yield attributes, and alleviating heavy metal toxicity in plants. **Plants**, Basel, v. 13, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13030446>.

LUO, Y. *et al.* The effects of multiwalled carbon nanotubes and *Bacillus subtilis* treatments on the salt tolerance of maize seedlings. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1093529>.

LUTTS, S. *et al.* Seed priming: new comprehensive approaches for an old empirical technique. *In: ARAUJO, S.; BALESTRAZZI, A. (ed.). New challenges in seed biology: basic and translational research driving seed technology.* London: IntechOpen, 2016. DOI: 10.5772/64420.

MAMO, B. S.; RAHNAMA, A.; HASSIBI, P. The influence of terminal heat stress on physiological and yield characteristics of promising sunflower cultivars in Ahvaz climate condition. **Environmental Stresses in Crop Sciences**, Birjand, v. 16, n. 3, p. 835-851, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22077/escs.2023.4928.2107>.

MARCOS-FILHO, J. **Seed physiology of cultivated plants.** Londrina: ABRATES, 2016.

MARTÍNEZ-BALLESTA, M. C. *et al.* The importance of ion homeostasis and nutrient status in seed development and germination. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10040504>.

MAZHAR, M. W. *et al.* Seed nano-priming with calcium oxide maintains the redox state by boosting the antioxidant defense system in water-stressed carom (*Trachyspermum ammi* L.) plants to confer drought tolerance. **Nanomaterials**, Basel, v. 13, n. 9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13091453>.

MCDONALD, M. B.; PHANEENDRANATH, B. R. A modified accelerated aging vigor test procedure. **Journal of Seed Technology**, Lincoln, v. 3, n. 1, p. 27-37, 1978.

MELO, G. M. *et al.* Effect of priming and different types of drying on the physiological quality of *Urochloa ruziziensis* seeds. **Journal of Seed Science**, Londrina, v. 43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v43250046>.

MEZZI OU MELZI, C. *et al.* Effects of hydropriming and chemical pretreatments of *Trigonella foenum-graecum* (L.) seeds on germination, antioxidant activities and growth. **Analele Universitatii din Oradea, Fascicula Biologie**, Oradea, v. 28, n. 2, p. 165-175, Nov. 2021.

MISSIO, E. L. *et al.* Produção de mudas de *Parapiptadenia rigida* pelo tratamento de sementes com *Trichoderma* (Hypocreales) e polímero. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, p. 21-32, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509864187>.

MORAIS, T. de C. *et al.* Qualidade fisiológica e ação enzimática antioxidante em sementes de girassol expostas à deterioração. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 34, n. 3, p. 570-579, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252021v34n308rc>.

NABAVI-PELESARAEI, A. *et al.* Prospects of solar systems in production chain of sunflower oil using cold press method with concentrating energy and life cycle assessment. **Energy**, Oxford, v. 223, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120117>.

NADARAJAN, J. *et al.* Seed longevity: the evolution of knowledge and a conceptual framework. **Plants**, Basel, v. 12, n. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030471>.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>.

NASCIMENTO, A. M. P. *et al.* Influence of color shading nets on ornamental sunflower development. **Ornamental Horticulture**, São João del Rei, v. 22, n. 1, p. 101-106, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14295/oh.v22i1.755>.

NOCTOR, G.; REICHHELD, J.; FOYER, C. H. ROS-related redox regulation and signaling in plants. **Seminars in Cell & Developmental Biology**, London, v. 80, p. 3-12, Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.semcd.2017.07.013>.

OLIVEIRA, F. de C. *et al.* Estudo in vivo da toxicidade e citotoxicidade de biocerâmicos de nanohidroxiapatita e nanotubos de carbônicos funcionalizado com óxido de grafeno. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 10, p. 78341-78352, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-312>.

OLIVEIRA, H. *et al.* Germinação de sementes e estabelecimento de plântulas de algodão submetidas a diferentes concentrações de NaCl e PEG 6000. **Espacios**, Caracas, v. 38, p. 13-28, 2017.

OLIVEIRA, L. Q. *et al.* Use of blood residue as alternative source of phosphorus in sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivation. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 74, n. 1, p. 153-159, jan./fev. 2022.

OLIVEIRA, T. F. *et al.* Protective action of priming agents on *Urochloa brizantha* seeds under water restriction and salinity conditions. **Journal of Seed Science**, Londrina, v. 43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v43237830>.

PEREIRA, T. M. *et al.* Does nitric oxide protect *Eucalyptus urophylla* seeds under salt stress conditions? **Journal of Seed Science**, Londrina, v. 42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v42236272>.

PLEH, A. *et al.* Evaluation of phytochemical antioxidant levels by hydrogen peroxide scavenging assay. **Bioengineering Studies**, Sarajevo, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37868/bes.v2i1.id178>.

RAHMANI, N. *et al.* Impacts of foliar exposure to multi-walled carbon nanotubes on physiological and molecular traits of *Salvia verticillata* L., as a medicinal plant. **Plant Physiology and Biochemistry**, New Delhi, v. 150, p. 27-38, 2020.

RAMALHO, L. B. *et al.* Hidrocondicionamento de sementes de *Piptadenia moniliformis* Benth. e seus efeitos sobre a tolerância ao estresse salino. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, p. 221-230, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509829998>.

REIS, S. P. *et al.* Nanotubos de carbono: conceitos gerais e aplicação em biosensores. **Scientia Amazonia**, Manaus, v. 7, n. 1, p. 53-59, 2018.

- RISEH, R. S. *et al.* Catalase-associated immune responses in plant-microbe interactions: a review. **International Journal of Biological Macromolecules**, Guildford, v. 280, n. 2, Nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135859>.
- RODRIGUES, D. F. *et al.* Toxicity of functionalized single-walled carbon nanotubes on soil microbial communities: implications for nutrient cycling in soil. **Environmental Science & Technology**, Washington, DC, v. 47, n. 1, p. 625-633, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/es304002q>.
- RODRÍGUEZ, C. *et al.* Correlations between some nitrogen fractions, lysine, histidine, tyrosine and ornithine contents during the germination of peas, beans, and lentils. **Food Chemistry**, London, v. 108, n. 1, p. 245-252, 2008.
- RONDANINI, D. P.; SAVIN, R.; HALL, A. J. Estimation of physiological maturity in sunflower as a function of fruit water concentration. **European Journal of Agronomy**, London, v. 26, n. 3, p. 295-309, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.11.001>.
- SAMADI, S. *et al.* Multi-walled carbon nanotubes stimulate growth, redox reactions and biosynthesis of antioxidant metabolites in *Thymus daenensis* celak. in vitro. **Chemosphere**, Oxford, v. 249, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126069>.
- SANTOS, P. L. F. dos; CASTILHO, R. M. M. de. Germinação e desenvolvimento de plântulas de girassol ornamental em substratos. **Ornamental Horticulture**, São João del Rei, v. 24, n. 4, p. 303-310, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/oh.v24i4.1152>.
- SARKAR, N. *et al.* Innovative application of facile single pot green synthesized CuO and CuO@ APTES nanoparticles in nanopriming of *Vigna radiata* seeds. **Environmental Science and Pollution Research**, London, v. 28, n. 11, p. 13221-13228, 2021.
- SHARMA, A. *et al.* Impacts of multi-walled carbon-nanotubes on the growth of pearl millet. **Journal of Applied Biology & Biotechnology**, Gwalior, v. 11, n. 4, p. 170-177, 2023. DOI: <https://doi.org/10.7324/JABB.2023.11513>.
- SIGALA-AGUILAR, N. A. *et al.* Bioactive metabolites upregulation in tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) through non-soil damaging foliar applications of multi-walled carbon nanotubes. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 338, Dec. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113603>.
- SILVA, A. L. da *et al.* Effect of cyanide by sodium nitroprusside (SNP) application on germination, antioxidative system and lipid peroxidation of *Senna macranthera* seeds under saline stress. **Journal of Seed Science**, Londrina, v. 41, n. 1, p. 86-96, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n1213725>.
- SINGH, A. *et al.* Nanocarbons in agricultural plants: can be a potential nanofertilizer? *In*: HUSSAIN, C. M.; MISHRA, A. K. (ed.). **Nanotechnology in environmental science**. New York: Wiley, 2018. p. 153-190.
- SMIRNOVA, E. A. *et al.* Multi-walled carbon nanotubes penetrate into plant cells and affect the growth of *Onobrychis arenaria* seedlings. **Acta Naturae**, Moscow, v. 3, n. 1, p. 99-106, 2011.

SOUSA, S. K. A. de. **Resposta do girassol à deficiência em estádios de desenvolvimento**. 2019. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Capitão Poço, 2019.

STEPHENIE, S. *et al.* An insight on superoxide dismutase (SOD) from plants for mammalian health enhancement. **Journal of Functional Foods**, New York, v. 68, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103917>.

SUN, Y. *et al.* WRKY33-PIF4 loop is required for the regulation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> homeostasis. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, Orlando, v. 527, n. 4, p. 922-928, July 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.05.041>.

SZÖLLÖSI, R. *et al.* Dual effect of nanomaterials on germination and seedling growth: Stimulation vs. phytotoxicity. **Plants**, Basel, v. 9, n. 12, p. 1745, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9121745>.

TIMOTEO, C. O. *et al.* Silver nanoparticles in the micropropagation of *Campomanesia rufa* (O. Berg) Nied. **Plant Cell Tissue and Organ Culture**, Dordrecht, v. 137, n. 2, p. 359-368, Feb. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01576-9>.

TIWARI, D. K.; DASGUPTA-SCHUBERT, N.; VILLASEÑOR, L. M. Water absorption kinetics of zea mays seedling using MWCNT as a growth promotor. **Microscopy and Microanalysis**, New York, v. 29, p. 21-23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/micmic/ozad067.010>.

VELIKOVA, V. *et al.* Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous poly-amines. **Plant Science**, Shannon, v. 151, p. 59-66, Feb. 2000. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1).

WAQAS, M. *et al.* Advances in the concept and methods of seed priming. *In*: HASANUZZAMAN, M.; FOTOPOULOS, V. (ed.). **Priming and pretreatment of seeds and seedlings: implication in plant stress tolerance and enhancing productivity in crop plants**. Singapura: Springer, 2019. p. 11-41. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8625-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8625-1_2).

WU, H. Z. *et al.* Exogenous application of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and nano-Selenium (Nano-Se) alleviated the PEG-induced water deficit stress and improved the crop performance of camelina. **Agronomy**, Basel, v. 13, n. 4, p. 979, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13040979>.

XIONG, M. *et al.* Brassinosteroid and gibberellin coordinate rice seed germination and embryo growth by regulating glutelin mobilization. **The Crop Journal**, Oxford, v. 9, n. 5, p. 1039-1048, Oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.11.006>.

XU, Z. *et al.* MWCNTs Alleviated saline-alkali stress by optimizing photosynthesis and sucrose metabolism in rice seedling. **Plant Signaling & Behavior**, Bonn, v. 18, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2283357>.

ZHANG, H. *et al.* Physiological effects of single-and multi-walled carbon nanotubes on rice seedlings. **IEEE Transactions on Nanobioscience**, New York, v. 16, n. 7, p. 563-570, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNB.2017.2715359>.

ZHANG, S. *et al.* Different concentrations of carbon nanotubes promote or inhibit organogenesis of Arabidopsis explants by regulating endogenous hormone homeostasis. **Planta**, Berlin, v. 261, n. 3, p. 1-14, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-025-04633-0>.

**APÊNDICE A - TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO REGISTRADAS NO LOCAL  
DO EXPERIMENTO – GRUPO DERKS, RESTINGA GROSSA, GLEBA 5**

Grupo Derks - Restinga Grossa - Gleba 5				
Data	Precipitação (mm)	Temperatura Máxima		Temperatura Mínima
		(°C)	Temperatura Média (°C)	(°C)
04/03/2024	0	35,7	25,83	17,77
05/03/2024	0	33,6	26,44	21,3
06/03/2024	0	30,7	24,65	21,6
07/03/2024	0	32,1	25,33	21,3
08/03/2024	16	31,2	25,38	22,4
09/03/2024	0	31,6	25,38	22,2
10/03/2024	15	31,9	25,34	22,8
11/03/2024	0	31,9	24,7	19,1
12/03/2024	0	34,2	24,58	17,8
13/03/2024	0	35,3	25,63	18,3
14/03/2024	0	36,4	27,7	21,7
15/03/2024	0	37,2	29,14	22,4
16/03/2024	0	36,6	29,3	22,4
17/03/2024	9	32,8	26,22	23,2
18/03/2024	0	32,5	26,68	22,4
19/03/2024	9	34,6	26,44	23,4
20/03/2024	0	32,9	26,58	22,2
21/03/2024	3	33,5	26,11	22,2
22/03/2024	0	26,4	22,32	18,27
23/03/2024	0	21,9	19,55	17,2
24/03/2024	0	25,5	20,97	17,9
25/03/2024	0	29,9	23,33	19,4
26/03/2024	0	28,4	23,55	20,5
27/03/2024	0	27,5	22,47	18,1
28/03/2024	0	26,87	21,49	17,07
29/03/2024	0	28,07	21,77	17,13
30/03/2024	0	32,5	25,11	20
31/03/2024	0	33,1	25,5	19,1
01/04/2024	0	31,6	25,9	20,1
02/04/2024	5	32	25,79	20,7
03/04/2024	0	31,5	24,79	20,37
04/04/2024	0	33,47	25,05	19,3
05/04/2024	0	35,9	25,92	18,5
06/04/2024	0	28,4	22,48	18,73
07/04/2024	0	31,4	24	19,2
08/04/2024	26	27,9	23,29	21
09/04/2024	0	30,5	24,48	19,8
10/04/2024	0	29,7	23,65	20
11/04/2024	0	31,4	24,76	20,6

Grupo Derks - Restinga Grossa - Gleba 5				
Data	Precipitação (mm)	Temperatura Máxima		Temperatura Mínima
		(°C)	Temperatura Média (°C)	(°C)
12/04/2024	0	29,7	24,17	19,9
13/04/2024	12	30,7	24,59	20,7
14/04/2024	3	25,9	22,95	20,8
15/04/2024	2	26,8	23,29	21,2
16/04/2024	3	28,5	25,04	22,2
17/04/2024	0	29,2	24,24	21,3
18/04/2024	0	22,4	20,3	15,8
19/04/2024	0	26,7	18,57	11,9
20/04/2024	0	28,9	20,47	14,1
21/04/2024	0	29,8	21,67	17
22/04/2024	0	31,4	22,87	15
23/04/2024	0	31,6	23,62	17,6
24/04/2024	0	31,6	24,17	17,4
25/04/2024	0	29,6	23,78	20,1
26/04/2024	0	31,4	23,77	19,9
27/04/2024	0	33,6	25,25	19,4
28/04/2024	0	33,5	26,11	20,1
29/04/2024	0	33,6	25,87	21,4
30/04/2024	0	31,97	24,99	19,3
01/05/2024	0	31,67	24,12	17,03
02/05/2024	0	31,43	24,27	18,03
03/05/2024	0	32,07	23,54	17,33
04/05/2024	0	33	23,49	17,3
05/05/2024	0	33,13	24,38	17,83
06/05/2024	0	32,3	24,28	16,93
07/05/2024	0	32,4	25,35	17,1
08/05/2024	0	31,03	24,84	19,2
09/05/2024	0	30,2	22,7	16,9
10/05/2024	0	29,17	22,71	18,9
11/05/2024	0	28	21	18,9
12/05/2024	0	26	20	18,9
13/05/2024	0	24	18	17,9
14/05/2024	0	19,57	15,6	14,2
15/05/2024	0	16,43	15,1	14
16/05/2024	12	21,3	13,57	13
17/05/2024	0	23,95	16,6	13
18/05/2024	12	25,22	19,2	18,9
19/05/2024	0	19,65	17,6	15,1
20/05/2024	0	26,1	20,73	17,5
21/05/2024	0	26,9	20,03	16,4
22/05/2024	0	30,3	22,36	17
23/05/2024	0	30,9	23,47	16
24/05/2024	10	21,1	19,26	17,6

Grupo Derks - Restinga Grossa - Gleba 5				
Data	Precipitação (mm)	Temperatura Máxima		Temperatura Mínima
		(°C)	Temperatura Média (°C)	(°C)
25/05/2024	0	21,7	18,1	14,7
26/05/2024	33	17,7	15,15	13,1
27/05/2024	3	19	17,21	15,1
28/05/2024	0	18,6	15,11	9,1
29/05/2024	0	22,4	13,3	6,1
30/05/2024	0	22,4	14,69	8,4
31/05/2024	0	22,6	15,02	8,4
01/06/2024	0	26,1	17,58	11,9
02/06/2024	0	27,9	19,67	13,5
03/06/2024	0	29,33	19,56	13
04/06/2024	0	22,97	17,6	13,73
05/06/2024	0	26,4	17,77	13,57
06/06/2024	0	29	18,22	10,33
07/06/2024	0	27,67	18,37	10,3
08/06/2024	0	27,37	18,38	11,57
09/06/2024	0	28,4	18,57	11,17
10/06/2024	0	29,6	19,86	12,3
	173	28,99434343	22,32	17,61373737
	173 mm	28,9	22,3	17,6

Fonte: elaboração própria.