UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CAROLINE SALLES DE MIRANDA MOTTA

NANOCONDICIONAMENTO COM ÓXIDO DE ZINCO EM SEMENTES DE TOMATE: ANÁLISE DE IMAGENS E QUALIDADE FISIOLÓGICA EM RESPOSTA A CONDIÇÕES DE ESTRESSE

UBERLÂNDIA-MG
2025

CAROLINE SALLES DE MIRANDA MOTTA

NANOCONDICIONAMENTO COM ÓXIDO DE ZINCO EM SEMENTES DE TOMATE: ANÁLISE DE IMAGENS E QUALIDADE FISIOLÓGICA EM RESPOSTA A CONDIÇÕES DE ESTRESSE

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de "Mestre".

Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Dr. Prof. Hugo César R. Moreira Catão

UBERLÂNDIA-MG
2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M921
2025

Motta, Caroline Salles de Miranda, 1994-
NANOCONDICIONAMENTO COM ÓXIDO DE ZINCO EM SEMENTES DE TOMATE: ANÁLISE DE IMAGENS E QUALIDADE FISIOLÓGICA EM RESPOSTA A CONDIÇÕES DE ESTRESSE [recurso eletrônico] / Caroline Salles de Miranda Motta. - 2025.

Orientador: Hugo César Rodrigues Moreira Catão.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
DOI http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.417
Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. Catão, Hugo César Rodrigues Moreira,1983-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

CAROLINE SALLES DE MIRANDA MOTTA

NANOCONDICIONAMENTO COM ÓXIDO DE ZINCO EM SEMENTES DE TOMATE: ANÁLISE DE IMAGENS E QUALIDADE FISIOLÓGICA EM RESPOSTA A CONDIÇÕES DE ESTRESSE

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia para obtenção do título de "Mestre".

Área de concentração: Produção Vegetal

Uberlândia, 29 de julho de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Flávia Andrea Nery Silva	UFU
Prof. Dra. Ana Carolina Silva Siquieroli	UFU
Prof. Dr. Daniel Teixeira Pinheiro	UNITRI

Prof. Dr. Hugo César Rodrigues Moreira Catão
ICIAG-UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA-MG
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppgagro.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 014/2025, PPGAGRO				
Data:	Vinte e nove de julho de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:30
Matrícula do Discente:	12312AGR006				
Nome do Discente:	Caroline Salles de Miranda Motta				
Título do Trabalho:	Nanocondicionamento com óxido de zinco em sementes de tomate: análise de imagens e qualidade fisiológica em resposta a condições de estresse				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Ana Carolina Silva Siquieroli - UFU; Flavia Andrea Nery Silva -UFU; Daniel Teixeira Pinheiro - UNITRI; Hugo César Rodrigues Moreira Catão - UFU orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Hugo César Rodrigues Moreira Catão, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Hugo Cesar Rodrigues Moreira Catão**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2025, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Ana Carolina Silva Siquieroli**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2025, às 17:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Flávia Andrea Nery Silva**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2025, às 17:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Daniel Teixeira Pinheiro**, **Usuário Externo**, em 30/07/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6547755** e o código CRC **BF876DAB**.

Criado por mbandrade, versão 6 por hugo.catao em 29/07/2025 17:23:37.

RESUMO

MOTTA, C. S. M. **Nanocondicionamento com óxido de zinco em sementes de tomate: análise de imagens e qualidade fisiológica em resposta a condições de estresse.** 2025. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

A qualidade fisiológica de sementes é fundamental para o estabelecimento inicial das culturas, especialmente em espécies sensíveis a estresses ambientais, como o tomateiro. O condicionamento fisiológico (*priming*) e o uso de nanopartículas vêm sendo explorados como estratégias para aumentar o vigor e a tolerância ao estresse. Este trabalho objetivou-se por avaliar o efeito do nanocondicionamento com nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) sobre a qualidade física e fisiológica de sementes de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) submetidas a condições de déficit hídrico e estresse térmico. Sementes da cultivar Gyottone foram submetidas a três tratamentos: controle (sem condicionamento), osmocondicionamento com PEG e osmocondicionamento com PEG + ZnO. Após o condicionamento, as sementes foram avaliadas por meio de análises físicas e fisiológicas nas temperaturas de 25 °C e 35 °C, com e sem déficit hídrico (-0,3 MPa). As nanopartículas de ZnO ainda foram caracterizadas por meio de difração de raios X, microscopia eletrônica de transmissão e de varredura. As análises mostraram que as nanopartículas de ZnO foram efetivamente incorporadas ao tegumento das sementes e apresentaram estrutura policristalina de wurtzita. As sementes condicionadas com PEG apresentaram maior vigor, melhor desenvolvimento de plântulas e melhor desempenho sob estresse hídrico e térmico. Em contrapartida, o tratamento com PEG + ZnO demonstrou sinais de fitotoxidez, com menor comprimento de plântulas e menor vigor, sobretudo sob estresse. A análise por raios X confirmou que sementes condicionadas apresentaram maior densidade e preenchimento interno, refletindo maior atividade metabólica. O nanocondicionamento com ZnO, na concentração testada, comprometeu o desempenho fisiológico das sementes e não mitigou os efeitos dos estresses avaliados, enquanto o osmocondicionamento com PEG foi eficaz em promover maior vigor e tolerância às condições adversas.

Palavras chaves: *Solanum lycopersicum* L., condicionamento fisiológico, nanopartículas

ABSTRACT

MOTTA, C. S. M. **Zinc Oxide Nanopriming in tomato seeds: image analysis and physiological response to stress conditions.** 2025. Dissertation (Master's in Agronomy) – Federal University of Uberlandia, Uberlândia.

The physiological quality of seeds is fundamental for the initial establishment of crops, especially in species sensitive to environmental stresses, such as tomato. Physiological conditioning (priming) and the use of nanoparticles have been explored as strategies to enhance vigor and stress tolerance. This study aimed to evaluate the effect of nanoconditioning with zinc oxide (ZnO) nanoparticles on the physical and physiological quality of tomato seeds (*Solanum lycopersicum* L.) subjected to conditions of water deficit and thermal stress. Seeds of the Gyottone cultivar were subjected to three treatments: control (without conditioning), osmoconditioning with PEG, and osmoconditioning with PEG + nanoparticles of ZnO. After conditioning, the seeds were evaluated through physical and physiological analyses at temperatures of 25 °C and 35 °C, with and without water deficit (-0.3 MPa). The ZnO nanoparticles were also characterized using X-ray diffraction, transmission electron microscopy, and scanning electron microscopy. The analyses showed that ZnO nanoparticles were effectively incorporated into the seed coat and exhibited a polycrystalline wurtzite structure. Seeds conditioned with PEG showed greater vigor, better seedling development, and improved performance under water and thermal stress. In contrast, the treatment with PEG + ZnO exhibited signs of phytotoxicity, with reduced seedling length and lower vigor, particularly under stress conditions. X-ray analysis confirmed that conditioned seeds exhibited higher density and internal filling, reflecting greater metabolic activity. Nanoconditioning with ZnO, at the tested concentration, compromised the physiological performance of the seeds and did not mitigate the effects of the evaluated stresses, while osmoconditioning with PEG was effective in promoting greater vigor and tolerance to adverse conditions.

Key words: *Solanum lycopersicum* L., priming, nanoparticles

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar mais um ciclo, de algumas etapas de grandes desafios e superações, as pessoas que estiveram comigo nesse processo foram de fundamental importância em cada fase!

Agradeço à minha família Denise Salles, Friederike Salles e Walther Salles, a grande incentivadora para que sempre continuasse me dedicando aos estudos, e acreditando sempre, que eu iria conseguir passar por esse desafio.

Ao meu namorado Lucas de Marco, por me incentivar a iniciar o mestrado e ao apoio durante os momentos mais difíceis, acompanhando desde os tempos de graduação até nossa defesa da dissertação.

Ao meu orientador Hugo Catão, que desde o início me recebeu de braços abertos para minhas ideias, testes, opiniões e conversas. Por estar sempre presente com paciência com todos os ensinamentos e apoio para cada desafio que se apresentava durante a execução desse trabalho. Um exemplo de professor e orientador que serei sempre grata.

Ao Núcleo de Estudos e Pesquisa em sementes (NEPSem) por todo o suporte na execução do trabalho, todo o cuidado nos experimentos e curiosidade para ensinar e aprender. Agradeço aos colegas Brenda Pontes, Ricardo Domingues, Ana Laura Santos e Gabriela Melazzo, por todos os ensinamentos, desde os mais básicos para utilizar os equipamentos do laboratório, até tirar dúvidas e o cuidado em auxiliar os experimentos. A dedicação de vocês e parceria para tocar esse projeto foi fundamental.

Aos membros da banca examinadora, Flávia Nery, Ana Carolina Siquieroli e Daniel Pinheiro, pelo seu tempo e dedicação para as contribuições propostas.

Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia que viabilizou a execução do trabalho.

E agradecimento final a todos que contribuíram de alguma forma para que esse trabalho se tornasse realidade!

“O estudo é a única coisa que não pesa
e não ocupa espaço.”
Friederike B. R. Salles

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11

2. MATERIAL E MÉTODOS 13

Condicionamento fisiológico 13

Difração de raios X (DRX) 14

Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) 14

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 14

Análises físicas (Teste de Raios X) 15

Análises fisiológicas 16

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 21

Difração de raios X (DRX) 21

Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) 22

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 22

Análises fisiológicas 27

4. CONCLUSÕES 36

5. REFERÊNCIAS 36

1. INTRODUÇÃO

A cultura do tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) ocupa um papel importante na produção de hortaliças no Brasil, no ano 2024 esteve entre as cinco principais com 62 mil hectares plantados e produzindo 4,7 milhões de toneladas. (IBGE, 2024). Buscando-se atingir altas produtividades um bom estande inicial da cultura se faz necessário. Plântulas vigorosas estabelecem-se mais rapidamente com melhor enfrentamento a condições estressantes (Silva et al., 2024), principalmente para o tomateiro que é sensível ao déficit hídrico e altas temperaturas.

Segundo Marcos-Filho (2015), o vigor da semente representa a força motriz da semente ao germinar. Uma semente com alto vigor apresentará raízes maiores comparadas com sementes consideradas fracas. Sementes com baixo vigor tendem a deteriorar mais rapidamente não fornecendo toda a reserva necessária para o desenvolvimento da plântula (Johnson, 2017). Lotes de sementes com baixo vigor quando semeados a campo apresentarão baixo estande, prejudicando o desenvolvimento das plantas e consequentemente o rendimento da lavoura.

Uma alternativa para promover uma rápida resposta da semente com efeito no vigor é a técnica de condicionamento fisiológico ou *priming*. A semente condicionada fisiologicamente apresenta uma rápida resposta de tolerância ao estresse, enquanto, é capaz de superar condições desfavoráveis à germinação, tais como altas temperaturas, salinidade, déficit hídrico entre outras (Kahn et al., 2023). Esse processo ocorre com o fornecimento gradual de água à semente, com a embebição ocorrendo até a fase II da germinação antes de protrusão radicular, momento no qual há estabilidade da disponibilidade de reservas e ocorre a reparação de membranas.

As nanopartículas, que possuem tamanhos menores que 100 nm, possuem conhecidos benefícios como nano fertilizantes, pesticidas e despoluente de águas e outros usos na agricultura (Kahn et Al., 2023) podendo ser compostas por diversos elementos e materiais. O uso de nanopartículas no condicionamento de sementes tem se mostrado uma técnica promissora para auxiliar na expressão do vigor e melhorar a performance da germinação (Rahimi et al., 2016; Mahakan et al., 2017; Nile et al., 2022). No entanto, diversos fatores podem influenciar na eficiência do tratamento com a nanopartículas, tais como tamanho da partícula, uniformidade desse tamanho e sua concentração na solução.

Dentre os micronutrientes para as plantas, que podem ser utilizados no nanocondicionamento, o zinco (Zn), atua em processos como cofator de enzimas biocatalíticas como oxidoredutases, transferases, hidrolases, ligases e isomerases. Além disso, promove aumento na produtividade, podendo ser utilizadas diversas fontes, como sulfato de zinco

($ZnSO_4$), zinco quelatado com EDTA (ácido etilenodiaminotetracético) e óxido de zinco (ZnO) (Savassa et al., 2018).

Nanopartículas de óxido de zinco (ZnO NP) vem sendo utilizadas com visível aumento de vigor e maiores crescimentos de plântulas. Durante o condicionamento, o tegumento das sementes retêm a maior parte do Zn, o que contribui para o aumento de produtividade em diversas culturas, como tomate, abóbora, pimenta, pimentão, entre outras (Latef et al., 2017; Savassa et al., 2018; Waqas Mazhar et al., 2022; El-Badri et al., 2021; Nile et al., 2022; Sembada & Lenggoro, 2024). Mesmo em condições de estresse foi observado que nanopartículas de óxido de zinco promoveram aumento de açúcares solúveis, proteínas solúveis, total de aminoácidos livres, prolina e fenóis totais e aumento de pigmentos fotossintéticos em sementes (Latef et al, 2017).

A utilização do condicionamento, com o uso de nanopartículas, pode desencadear regulações enzimáticas, hormonais, fisiológicas, transcriptômicas, metabolômicas e proteômicas em embriões durante a germinação e o crescimento das plantas (Janata et al., 2024), podendo promover também um maior desempenho das sementes de tomate e tornar o cultivo dessa cultura mais eficiente agronomicamente.

As alterações em embriões após condicionamento das sementes podem ser benéficas dependendo do tratamento e da espécie. Assim, o uso de técnicas modernas e de alto desempenho para verificar a eficácia do condicionamento podem gerar resultados consistentes e rápidos, de forma menos subjetiva e não destrutiva, identificando estruturas internas e parâmetros físicos correlacionados com a germinação (Mahajan et al., 2015; Machado et al., 2020; Bianchini et al., 2021).

Dentre as técnicas, a análise baseada em radiação eletromagnética de raios X pode ser utilizada na inspeção da qualidade de sementes (Rahman e Cho, 2016; Krzyzanowski et al., 2020; Medeiros et al., 2020). Na cultura do tomate é possível realizar a predição de sementes com alto vigor, maturidade fisiológica e viabilidade das sementes (Borges et al, 2019; Hong et al, 2023). No entanto, a análise visual das imagens radiográficas é demorada e pode gerar erros de leitura (Medeiros et al., 2018). Com isso, o processamento digital de imagens por meio de *softwares* (ImageJ®) e *macros* (*PhenoXray* e *IJCropSeed* (Medeiros et al., 2020)), podem auxiliar na automação de análises e na fenotipagem em larga escala das radiografias obtendo-se parâmetros relacionados à qualidade fisiológica das sementes condicionadas.

Além disso, pode ser uma alternativa a ser utilizada em programas de controle de qualidade após o condicionamento fisiológico de sementes, sendo importante para a tomada de

decisão quanto à aprovação ou descarte de lotes de sementes, o que significaria economia de tempo e recursos. Diante o exposto, considerando os benefícios já conhecidos das técnicas de condicionamento e a incipiente utilização de nanopartículas nesse processo, objetivou-se com esse trabalho, verificar as alterações físicas e fisiológicas, bem como a eficácia do nanocondicionamento de sementes de tomate submetidas a condições de estresse.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Sementes (LASEM) do Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Umuarama, na cidade de Uberlândia, MG. Foram utilizadas sementes híbridas de um lote tomate Gyottone (teor de água 9,5%; germinação 80%) da empresa Hortec. As nanopartículas de ZnO foram sintetizadas no Laboratório de Novos Materiais Isolantes e Semicondutores do Instituto de Física da UFU, de acordo com a metodologia descrita por Silva et al. (2018).

Condicionamento fisiológico

O condicionamento fisiológico foi realizado em solução aerada de polietilenoglicol (PEG 6000) a -1 MPa por 24 horas a 15 ºC, sendo a concentração equivalente de 273,237 g L^{-1} de água, definida conforme Villela et al. (1991) derivada da equação proposta por Michel & Kaufmann (1973), sendo:

$$P = (1{,}18\ x\ 10^{-2})\ C - (1{,}18 \times 10^{-4})\ C^2 + (2{,}67 \times 10^{-4})\ CT + (8{,}39 \times 10^{-7})\ C^2\ T$$

Onde P = potencial osmótico (bar); C = concentração do agente osmótico (g de PEG 6000/L H_2O); T = temperatura (ºC).

Neste método, 2,0 g de sementes foram colocadas em erlenmeyers (250 ml) contendo 40,0 mL de solução osmótica, acoplada a uma bomba de ar comprimido para promover a aeração das soluções. Já as sementes condicionadas com polietilenoglicol + nanopartículas de ZnO (PEG + ZnO) foi realizada conforme descrito anteriormente, acrescido de 6 mg. mL^{-1} de nanopartículas de ZnO, dose obtida a partir de pré-testes. Como testemunha (controle) foram utilizadas sementes não condicionadas.

Ao final do período de condicionamento, as sementes foram retiradas, lavadas em água corrente para remoção dos resíduos da solução. Em seguida, as sementes foram submetidas a determinação do grau de umidade realizado por meio do método da estufa a 24 horas a 105 °C

(Brasil, 2009). Sementes condicionadas com polietilenoglicol e polietilenoglicol + nanopartículas de ZnO, atingiram teor de água de 46,7% e 47,4%, respectivamente.

As sementes condicionadas foram colocadas para secar sobre papel toalha em temperatura ambiente por 72 horas, em condições de ambiente de laboratório. Após a secagem, o teor de água das sementes foi novamente determinado, sendo 10,7% e 9,0%, para sementes condicionadas com PEG e PEG + ZnO, respectivamente. Sementes da testemunha (não condicionadas) estavam com 11% de teor de água.

Difração de raios X (DRX)

Para confirmar a natureza cristalina da partícula sintetizada de ZnO foi realizada difração por raios X (XRD) utilizando o difratômetro Shimadzu, modelo XRD 6000, locado no Laboratório Multiusuário do Instituto de Química (LAMIQ) da UFU. As condições as quais ocorreram a difração foram: fonte monocromática CuKα (λ=1,54056 Angstrons); voltagem (kV): 40; corrente (mA): 30; ângulo de varredura (2θ): 5 – 90; com velocidade de varredura de 2° min^{-1}. O resultado obtido da linha de difração foi identificado por comparação com linhas-padrões obtidas no banco de dados cristalográficos da *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD), disponível para acesso por meio do portal da pesquisa conveniado pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)

Uma amostra de 4 mg nanopartícula de ZnO foi analisada por meio de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), sendo solubilizadas em 1 mL de água deionizada. A dispersão produzida foi então mantida em banho ultrassônico por 30 minutos, ocorrendo a desagregação das partículas. Após esse procedimento, 1 gota da amostra foi depositada em grids de cobre de 300 mesh recobertos com filme de carbono (*Formvar*) e seca em temperatura ambiente por 48 horas. As imagens foram realizadas no microscópio eletrônico Hitach (HT7700), localizado na Rede de Laboratórios Multiusuários (RELAM) da UFU, com resolução de 80 kV.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a confirmação da presença, morfologia e tamanho das nanopartículas sobre o tegumento das sementes de tomate (tratamento PEG + ZnO) foi realizada a análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV). A semente foi metalizada com revestidor de pulverização Quorum Technologies Ltd, modelo Q150R ES, alocado no Laboratório

Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) no Instituto de Química da UFU. Foi depositada sobre a semente uma camada de ouro de aproximadamente 10 nm com a função de auxiliar na resolução e captura de imagem pelo MEV. A sementes então foram submetidas em vácuo para análise no MEV TESCAN modelo VEJA 3 LMU. O MEV foi configurado para a voltagem de aceleração de feixe de 20.00 kV, magnificência de 5000x e 10000x, distância de trabalho de 14.7 mm, elevação de 35 graus, número de canais 2048, faixa de energia de 20 kV, energia por canal 10.0 eV, identificação do tipo de detector 9, tipo de detector X-Act, tipo de janela SATW, detector principal Xact. Após foi utilizado o detector EDS (*energy dispersive x-ray detector* ou espectroscopia de energia dispersiva) e pelo *software* do sistema foi determinado a abundância e composição química dos elementos presentes na microscopia.

Análises físicas (Teste de Raios X)

Para avaliar internamente a morfologia das sementes de tomate, dez repetições com 20 sementes de cada tratamento foram analisadas. As amostras foram dispostas de forma ordenada e dispostas em placas de acetato transparente sobre fita adesiva de dupla face. As sementes foram submetidas à radiação em equipamento de raios X "Faxitron HP", modelo 43855A, na intensidade de 30 Kv e expostas à radiação por 10 segundos, a uma distância focal de 40 cm. O contraste da imagem foi calibrado em 970 (width) x 2300 (center). A imagem gerada foi salva em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) para ser processada e analisada.

A análise das imagens automatizadas foi realizada no *software* livre ImageJ® (https://imagej.nih.gov/ij/download.html), realizada com o auxílio da macro *PhenoXray* (https://sites.google.com/ufv.br/phenoray). A imagem foi primeiramente segmentada pela ferramenta *Threshold* utilizando o método multiníveis Yen para definir os limites de cada semente de tomate. As regiões segmentadas foram então analisadas pela ferramenta *Analyse Particles* no ImageJ®. Foram consideradas apenas partículas entre 2 e 10 mm ignorando assim possíveis ruídos na imagem. Os parâmetros analisados por essa macro foram:

Área – em *pixels* quadrados e convertidas em milímetros quadrados (mm^2); **Perímetro** – comprimento em milímetros da linha externa da seleção; **Densidade relativa** (média de cinza) – é a soma dos valores de cinza de todos os *pixels* na área selecionada dividido pelo número de *pixels* na seleção, expresso em $cinza.pixel^{-1}$; **Densidade integrada** – é a soma dos valores de *pixels* na imagem selecionada, sendo o produto da área dividido pela densidade relativa expresso em $cinza.mm^2.pixel^{-1}$; ambas as densidades representam maior matéria internamente

na semente, quanto maior a densidade, maior o volume de reservas e/ou maior o desenvolvimento do embrião.

Para a variável **Preenchimento (%)** – duas máscaras foram criadas, uma selecionando um método limite que seleciona *pixels* com valores mais altos na seleção e outra capaz de selecionar toda a semente, incluindo furos (espaços vazios na semente). Ao final, as máscaras binarizadas são subtraídas e o resultado é a porcentagem de tecidos com maior densidade (cinza definido pelo primeiro método) dentro da semente. Para essa variável foi utilizada macro *IJCropSeed* (https://sites.google.com/ufv.br/ijcropseed/home) no *software* ImageJ®. Por essa macro as imagens foram processadas automaticamente apenas com a indicação da pasta onde as imagens estavam armazenadas. Após seleção da imagem, resolução e *Threshold* mais adequada, o programa gerou uma imagem em formato TIFF e outro em TXT (*Text File*) com a indicação ordenada das sementes na imagem e os índices gerados.

Análises fisiológicas

Após a aquisição das imagens radiográficas, as sementes foram avaliadas quanto à sua qualidade fisiológica:

Germinação – quatro repetições de 50 sementes de tomate foram semeadas no interior de caixas *gerbox*, contendo duas folhas de papel mata borrão, umedecidas com 2,5 vezes o peso do papel seco com solução de PEG 6000 (-0,3 MPa) (Villela et al., 1991) para simulação do déficit hídrico, ou água destilada (0 MPa) (controle). As caixas foram vedadas com policloreto de vinila (PVC) para evitar perda de água. Após, as caixas de cada tratamento foram acondicionadas em câmara de demanda biológica de oxigênio (BOD) a 25 °C e 35 °C (estresse térmico) sob fotoperíodo de 12 horas. Foram realizadas contagens diárias do número de plântulas normais e aos 14 dias foi calculada a porcentagem final de germinação (Brasil, 2009) tendo os resultados expressos em porcentagem de germinação. Em seguida foram calculados os seguintes parâmetros:

Índices de germinação – por meio do pacote SeedCalc (Silva et al., 2019) no *software* estatístico R (R Core Team, 2022) foram obtidas as variáveis:

- Tempo para atingir 50% de germinação (T50) (Adaptado Farooq et al. (2005)):

$$T50 = \frac{ti + \left\{\left[\frac{N}{\left(\frac{100}{50}\right)}\right] - n_i\right\}(t_j - t_i)}{(n_j - n_i)}$$

Onde N é o número final de sementes germinadas e ni e nj são o total de número de sementes germinadas em contagens seguidas no tempo ti e tj respectivamente quando: $ni < \frac{N+1}{2} < nj$. Sendo os maiores valores de tempo para 50% da germinação representando sementes menos vigorosas.

- Uniformidade de germinação (UnifG) (Demilly et al. (2014)):

$$UG = \left(\frac{ti + \left\{\left[\frac{N}{\left(\frac{100}{90}\right)}\right] - n_i\right\}(t_j - t_i)}{(n_j - n_i)} \right) - T10$$

Sendo o tempo para obter a germinação de 10% das sementes subtraído do tempo para a germinação de 90% das sementes. Sendo os maiores valores de uniformidade de germinação representando tratamentos com maior uniformidade.

- Sincronia (Sinc) (Primack (1980)):

$$Z = \sum Cni, 2\ /N$$

com *Cni,2* dado por:

$$Cni, 2 = ni\frac{(ni-1)}{2}\ e\ N = \Sigma ni\ (\Sigma ni - 1)/2$$

Sendo os maiores valores de sincronia representando tratamentos com as sementes germinando de forma mais espaçada no tempo.

- Incerteza de germinação (IG) (Labouriau e Valadares (1976)):

$$\bar{E} = -\sum_{i=l}^{k} f_i\ log2\ f_i$$

com *fi* dado por:

$$f_{i=} n_i / \sum_{i=l}^{k} n_i$$

Sendo f_i a frequência relativa e n_i o número de sementes germinadas no dia i. Os tratamentos com maior valor de incerteza de germinação indicam que as sementes germinaram de forma mais concentrada.

Teste de emergência – adaptado de Krzyzanowski et al. (2020), utilizando 4 repetições de 50 sementes, dispostas em caixas *gerbox* preenchidas com 240 g de areia previamente umedecida com água destilada (sem condições de déficit hídrico) e cobertas com mais 30 g da areia úmida. Para simular o déficit hídrico, as sementes também foram dispostas em caixas *gerbox* preenchidas com mesma quantidade de areia, conforme descrito, porém, previamente umedecida com solução de PEG 6000 (-0,3 MPa) (Villela et al., 1991). As caixas foram vedadas com policloreto de vinila (PVC) para evitar perda de água e posteriormente, foram acondicionadas em câmara de demanda biológica de oxigênio (BOD) a 25 °C e 35 °C. A cada três dias as caixas foram pesadas, quando observado redução do peso inicial, sempre que necessário, foi adicionado água destilada para repor peso. Aos cinco dias foi determinada a emergência inicial (Ei) e no décimo quarto dia a emergência final (Ef). Os resultados foram expressos em porcentagem.

Tempo médio de emergência (TME) – as avaliações foram realizadas diariamente com contagens de plântulas normais emergidas, adotando como critério a abertura das folhas cotiledonares. Para o cálculo foi utilizada a equação proposta por Edmond e Drapala (1958):

$$TME = \frac{E1 * T1 + E2 * T2 + \cdots + Ei * Ti}{E1 + E2 + \cdots + Ei}$$

Sendo: TME o tempo médio necessário para atingir emergência; E: número de plântulas normais emergidas com os cotilédones totalmente abertos; T: tempo em dias. Os maiores valores de TME, expressos em dias, representam tratamentos com sementes de menor vigor.

Comprimento de plântulas – a avaliação foi realizada sobre o comprimento da parte aérea e raiz. Para a mensurar o comprimento, vinte sementes de cada tratamento foram dispostas em papel de germinação , umedecidas com 2,5 vezes o peso do papel seco com solução de PEG 6000 (-0,3 MPa) (Villela et al., 1991) para simulação do déficit hídrico, ou água destilada (0 MPa) (controle) e posteriormente confeccionados rolos de papel. Foram realizadas 10 repetições de cada tratamento. Os rolos foram mantidos em sala de germinação por 5 dias a 25

°C e a 35°C. Após este período, as plântulas de cada repetição foram transferidas do rolo de papel de germinação para uma folha de Etil Vinil e Acetato (EVA) de coloração azul com dimensões de 30 cm x 22 cm. Em seguida, foram feitas as imagens, fotografadas com câmera de 12 MP e resolução de 4000 x 3000 *pixels* e processadas individualmente pelo *software* ImageJ®. Os valores de comprimento obtidos foram analisados por meio do pacote *SeedCalc* (Silva et al., 2019) no programa R (R Core Team, 2022). Foram obtidas as seguintes variáveis:

- Comprimento médio de parte aérea (Média CPA) (Nakagawa et al., 1999)

$$Média\ PA = \frac{\sum_{i=l}^{k} HL}{n}$$

Sendo HL o comprimento do hipocótilo de cada plântula e n o número total de plântulas avaliadas. Sendo as medidas expressas em milímetros (mm).

- Comprimento média da raiz (Média CR) (Nakagawa et al., 1999)

$$Média\ PR = \frac{\sum_{i=l}^{k} RL}{n}$$

Sendo RL o comprimento da radícula de cada plântula e n o número total de plântulas avaliadas. Sendo as medidas expressas em milímetros (mm).

- Comprimento médio total da plântula (CTP) (Nakagawa et al., 1999)

$$Média\ Total = \frac{\sum_{i=l}^{k} SL}{n}$$

Sendo SL o comprimento total de cada plântula e n o número total de plântulas avaliadas. Sendo as medidas expressas em milímetros (mm).

- Média da razão entre parte aérea e radicular (CPA/CR) (Benincasa, 2003)

$$Média\ R = \frac{\sum_{i=l}^{k} RRA}{n}$$

Sendo RRA o a razão entre a radícula e o hipocótilo de cada plântula e n o número total de plântulas avaliadas. Os maiores valores representam um maior comprimento de parte aérea em relação ao comprimento da radícula.

- Uniformidade (Unif) (Sako et al., 2001)

$$Uniformidade = \max[1000 - (0{,}75 * sh + 0.5 * sr + 2{,}5 * s_{total} + 50 * srh) - 0 * nmortas]$$

Onde sh, sr e srh são os desvios padrão do comprimento do hipocótilo, radícula e razão radícula/hipocótilo, respectivamente. Os maiores valores indicam plântulas com maior uniformidade.

- Crescimento (Cresc) (Sako et al., 2001)

$$Crescimento = [(média(h) * wh) + (média(r) * wr)]$$

Sendo média (h) e média (r) as médias do comprimento de hipocótilo e radícula, respectivamente. Wh e wr são os pesos ajustados para hipocótilo e radícula, contudo, com a referência dos valores de 10 e 90, respectivamente. Os maiores valores refletem o aumento no comprimento das plântulas.

- Índice de Vigor (IV). (Sako et al., 2001)

$$Índice\ de\ Vigor = (Crescimento * w_g) + (Uniformidade * w_u)$$

Sendo w_g o peso ajustável para o índice de crescimento; w_u o peso ajustável para o índice de uniformidade de plântula. Os maiores valores correspondem a tratamentos com sementes de maior vigor.

Massa Seca – plântulas normais obtidas ao final do teste de germinação tiveram seus cotilédones retirados e foram dispostas em sacos de papel *kraft* e acondicionadas em estufa com circulação de ar forçado a 65 ºC por 72 horas. Após esse período, o material foi pesado em balança de precisão de 0,001 g (Krzyzanowski *et al*. 2020). Os resultados foram expressos em miligramas.

Análise estatística – para a avaliação da qualidade das sementes, o delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de resíduos (Shapiro-Wilk) e ao teste de homogeneidade de variâncias (OneillMathews). Os dados obtidos na análise de qualidade física foram submetidos à análise de variância. As médias dos tratamentos de condicionamento foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Para a análise da qualidade fisiológica o experimento foi conduzido em esquema fatorial 3 x 2 (condicionamento fisiológico x déficit hídrico, para cada temperatura). Os dados de comprimento foram transformados utilizando $\sqrt{x} + 1$, enquanto, os demais foram transformados utilizando $\sqrt{x}$. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de

significância. A análise de componentes principais foi realizada por meio da utilização do pacote FactoMineR (Lê et al., 2008), enquanto, a construção da matriz de correlação ocorreu por meio do pacote Corrplot (Hahsler et al, 2020). As análises foram realizadas por meio do software R Studio 2023.03.0+386. (R Development Core Team, 2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Difração de raios X (DRX)

As nanopartícula possuem estrutura policristalina hexagonal de wurtzita, assemelhando-se ao padrão de difração obtido no banco ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) (Figura 1). Os picos de maior intensidade, corresponderam aos planos (100), (002), (101). Já os picos de menor intensidade (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), (202), (104) e (203) foram semelhantes aos observados por Šarić et al (2022) em que, pequenos picos, se mostram distintos do padrão esperado e podem ser considerados contaminações da amostra, embora, não tenham sido detectadas impurezas (cristais) em determinados ângulos durante o teste que confirmasse a composição destas. Assim, ainda é possível afirmar que a nanopartícula utilizada é caracterizada como óxido de zinco (ZnO).

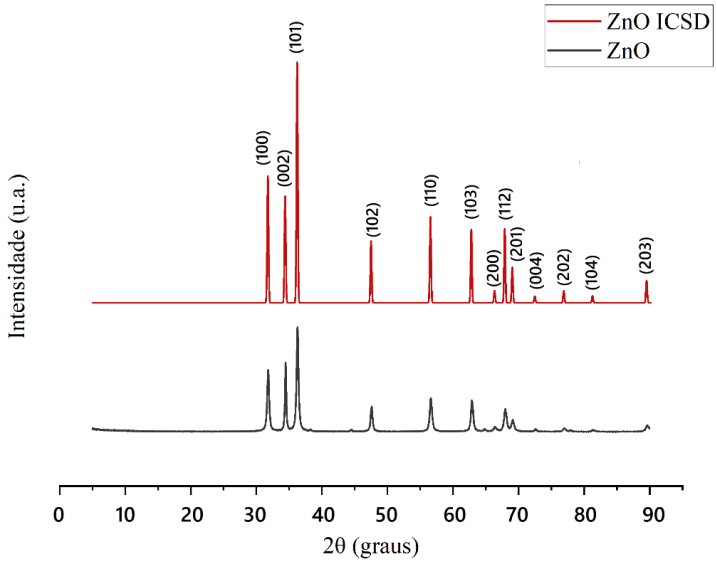

Figura 1. Difratograma de Raios X indicando a presença da fase hexagonal de nanopartículas de ZnO ICSD (Padrão) e ZnO.

Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)

Por meio das micrografias obtidas na microscopia eletrônica de transmissão (MET), verificou-se que as nanopartículas possuem a forma de bastões, além de formas prismáticas indefinidas, e variações de tamanho em que suas dimensões foram aproximadamente de 140 x 40 nm (Figura 2). O tamanho encontrado difere de alguns autores que caracterizaram as nanopartículas de ZnO com tamanhos aos redor de 25 nm (Donia & Carbone, 2023; El-Badri et al., 2023). Tamanhos menores que 50 nm associados a altas concentrações podem reduzir a performance das sementes (Plaksenkova et al., 2020). Foram observadas também aglomerações de partículas. Por meio dessas caracterizações é possível observar a morfologia, a composição, o diâmetro, a dispersão de tamanho, e a estabilidade coloidal (Singh et al., 2018; Aygün et al., 2019; Baran et al., 2020).

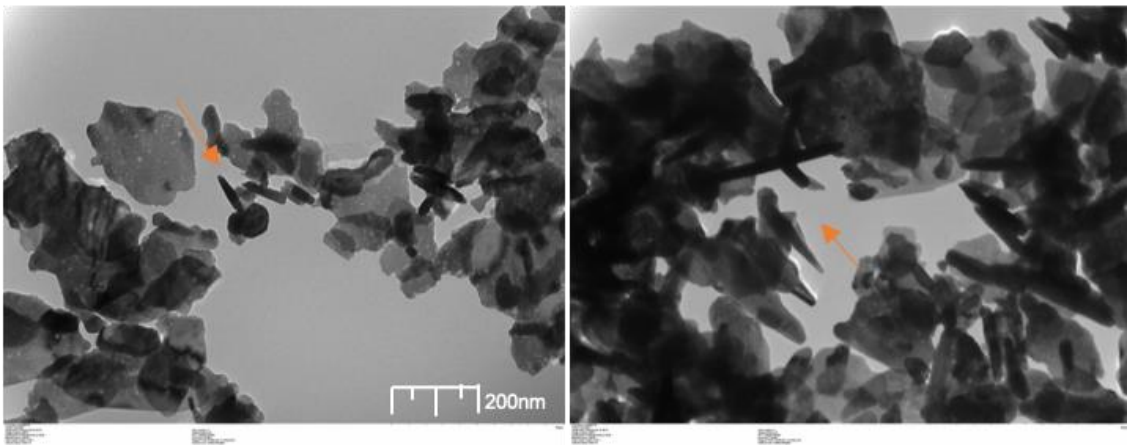

Figura 2. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de transmissão (MET) identificando as partículas primárias de ZnO.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura 3 pode ser observado as micrografias da semente de tomate (a), do pó das nanopartículas de oxido de zinco (b e c), bem como sua presença (d) entre os tricomas e no tegumento da sementes. Ainda pode ser observado os Spectrum (e) (refere-se ao espectro de energia dispersiva de raios X) e os pontos mais vibrantes (f) que apresentam maior concentração de ZnO na superfície da semente. As nanopartículas de ZnO se apresentaram aglomeradas com superfície esbranquiçada e tamanho menor que 100 nm.

Por meio da espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi possível realizar o mapeamento e confirmar na composição da amostra a presença de zinco em todos os pontos analisados da semente. Os principais constituintes observados foram zinco, carbono e oxigênio. O comportamento das informações obtidas por EDS, demonstra que as energias associadas

aos elétrons não acusou 100% para nenhum elemento da composição, no entanto, na fase mais densa o zinco apresentou peso de 60% (Figura 4). Na análise de EDS é possível confirmar presença significativa do zinco, sendo consistente com a presença de nanopartículas nas micrografias de MEV, conforme relataram Díaz-Cruz et al., (2016), em que os maiores picos coincidem com as maiores concentrações do elemento de interesse.

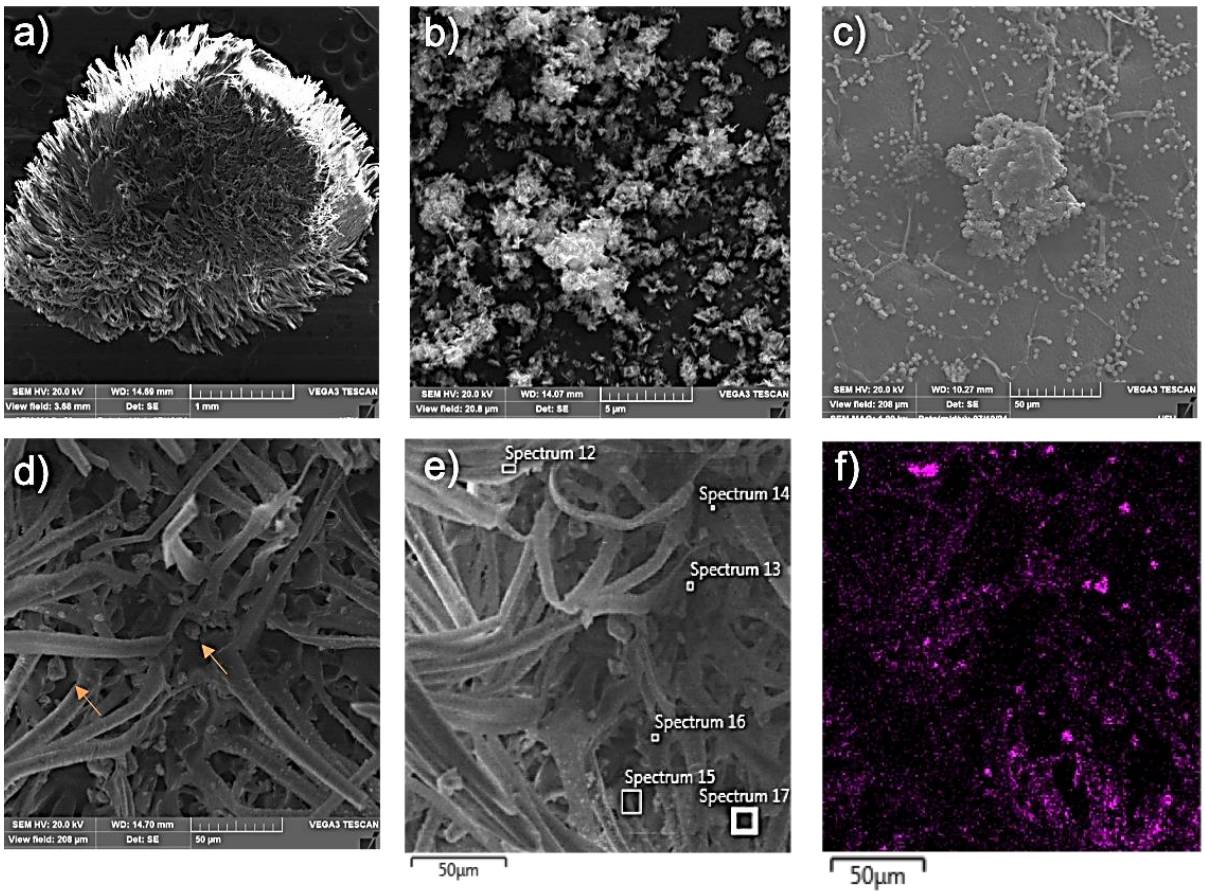

Figura 3. Micrografia obtida por MEV da semente de tomate (a), do aglomerado que compõe o pó (b e c) contendo nanopartículas de ZnO entre os tricomas e tegumento (d) e spectrum de energia dispersiva de raios X (e) e os pontos vibrantes (f) de maior concentração de ZnO na superfície da semente. (Magnificação: 5.000X).

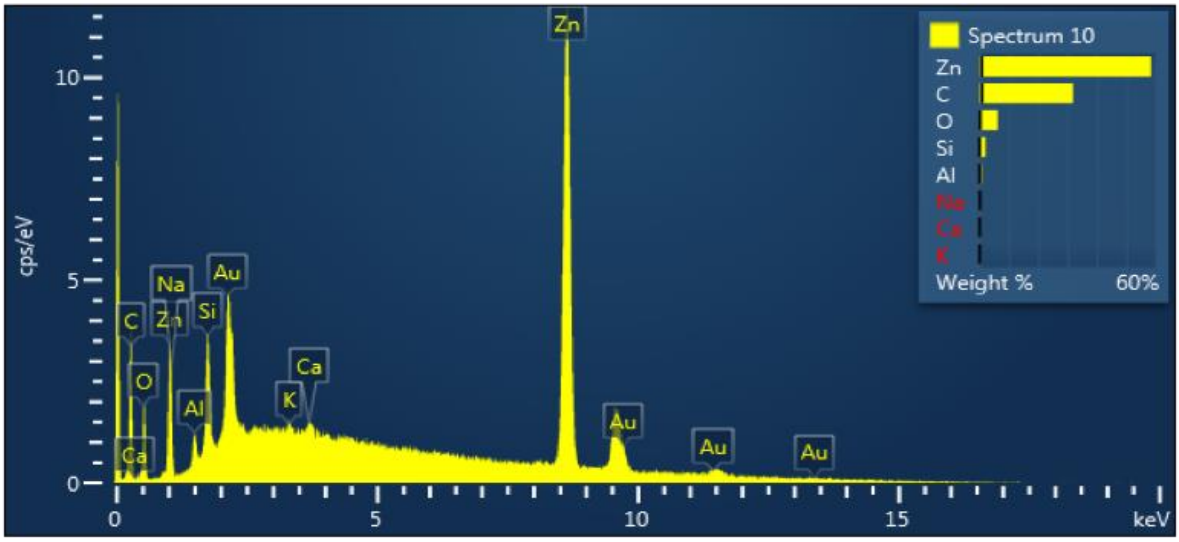

Figura 4. Elementos químicos detectados pelo EDS, durante a análise do MEV, presentes na superfície de sementes de tomate condicionadas com nanopartículas de ZnO.

Análises físicas (Teste Raios X)

As medidas de área e perímetro das sementes condicionadas (PEG e PEG + ZnO) se diferenciam do controle (Figura 5A e 5B). Isto se deve ao início do processo de germinação, durante a fase I da embebição, no qual há a ativação do metabolismo e início da multiplicação celular, além de ocorrer posteriormente o consumo das reservas. Resultados semelhantes foram reportados por Peris et al. (2024) ao analisar os raios X de sementes condicionadas e não condicionadas de *Urochloa decumbens*. Esses autores verificaram que devido a não embebição, as sementes do controle (não condicionadas) apresentaram valores de perímetro, área, escala de cinza e densidade integrada menor quando comparadas as sementes condicionadas. Abud et al. (2018) relataram que sementes de brócolis possuíam maior área e maior densidade, logo se mostraram mais vigorosas.

Vários fatores podem influenciar na obtenção do valor de densidade das sementes, tais como espécie, teor de água, sanidade, ataque de pragas e composição química da semente (Medeiros et al., 2020). Ao analisar a densidade relativa e integrada (Figura 5D e 5E), as sementes condicionadas com PEG e PEG + ZnO apresentaram maiores valores, indicando que os fótons dos raios X tiveram maior resistência para ultrapassar os tecidos internos da semente, gerando mais *pixels* cinza, e consequentemente, sendo um indicativo de tecidos mais densos, conferindo maior nível de radiopacidade na imagem de radiografia (Medeiros et al., 2020; Silva et al., 2020). Medeiros et al. (2018) indicaram a tendência que quanto maior a densidade relativa melhor é a qualidade fisiológica das sementes. A densidade tecidual e a média de cinzas obtida pelo teste de raios X com a qualidade fisiológica das sementes está relacionada a maior integridade e desenvolvimento do embrião, além de um maior acúmulo de reservas (Cheng et

al., 2015). Imagens que apresentam manchas com maior nível de radiolucidez (escuro), reduzindo valor de cinza, indicam deterioração de tecidos, danos mecânicos, menor enchimento embrionário ou má formação da semente (Medeiros et al., 2018; Medeiros et al., 2020).

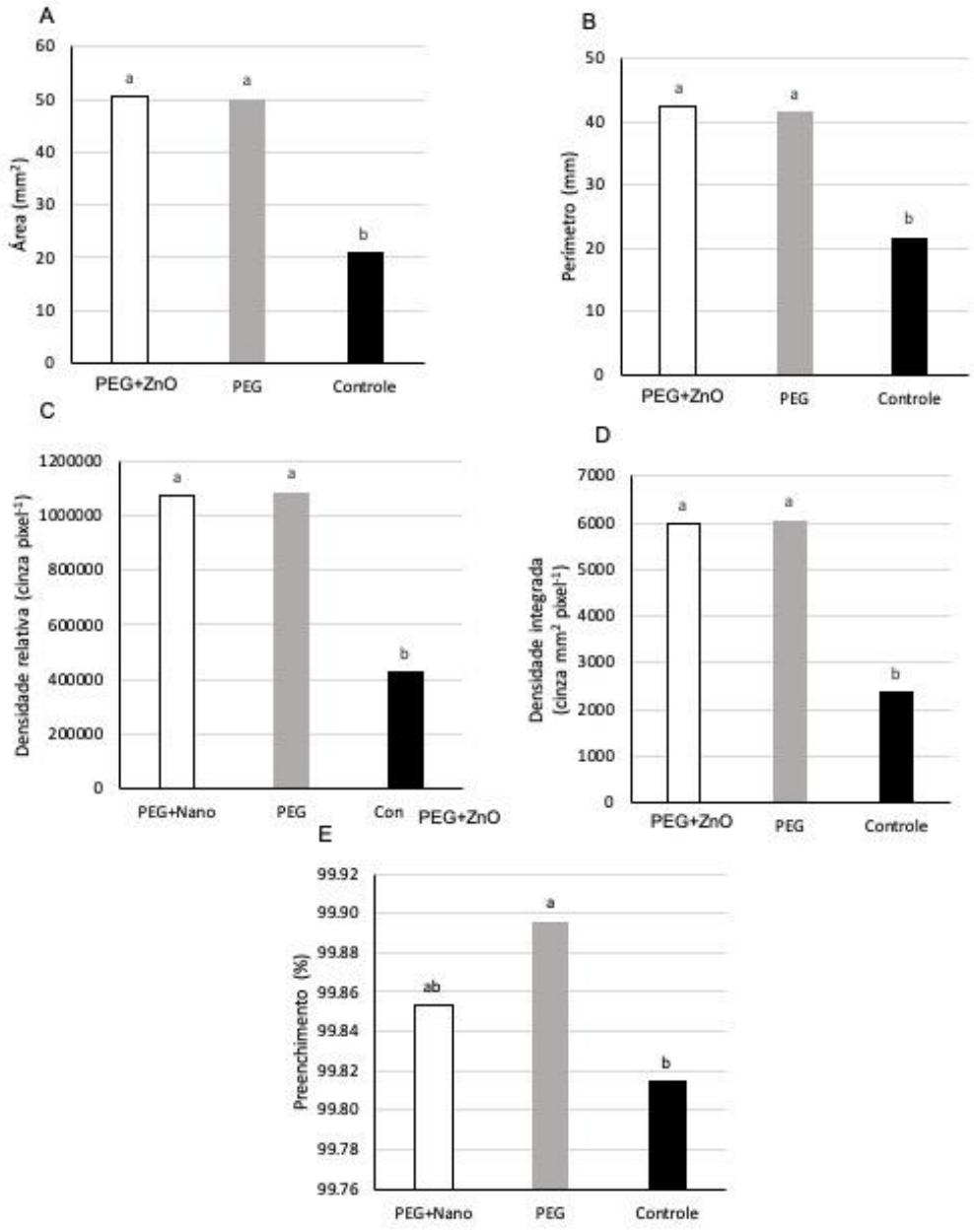

Figura 5. Área da sementes (mm^2) (A), Perímetro (mm) (B), Densidade Relativa (cinza $pixel^{-1}$)(C), Densidade integrada (cinza mm^2 $pixel^{-1}$) (D) e Preenchimento (%) (E) gerados a partir da imagem de raios X dos tratamentos. Médias seguidas pela mesma letra não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação ao preenchimento das sementes observa-se que há diferença entre as sementes condicionadas com PEG e o controle, sendo este último com menor preenchimento (99,81%) (Figura 5G). As sementes condicionadas possuem preenchimento de 99,90% e isso pode ser atribuído aos início do desenvolvimento do eixo embrionário. Ressalta-se que

Medeiros et al. (2020) e Silva et al. (2014) indicaram que há relação entre espaços vazios da semente e sua qualidade fisiológica, com isso, o preenchimento é de suma importância. Assim, esse atributo pode ser útil na avaliação do vigor, permitindo a classificação das sementes com base na proporção de preenchimento interno: quanto maior essa proporção, maior a presença de estruturas e, consequentemente, maior o vigor.

Na Figura 6, podem ser observadas as imagens de raios X e 3D das sementes de tomate. É possível visualizar que as sementes que foram osmocondicionadas, tanto com PEG quanto com PEG + ZnO, apresentaram maior diferenciação celular no embrião do que as sementes não condicionadas. Verificou-se que tecidos com maior integridade apresentaram imagens mais opacas, caracterizadas por zonas de alta densidade, evidenciadas pelas colorações verde, amarela e vermelha. Esse padrão se deve à maior resistência desses tecidos à passagem dos raios X (Medeiros et al., 2020).

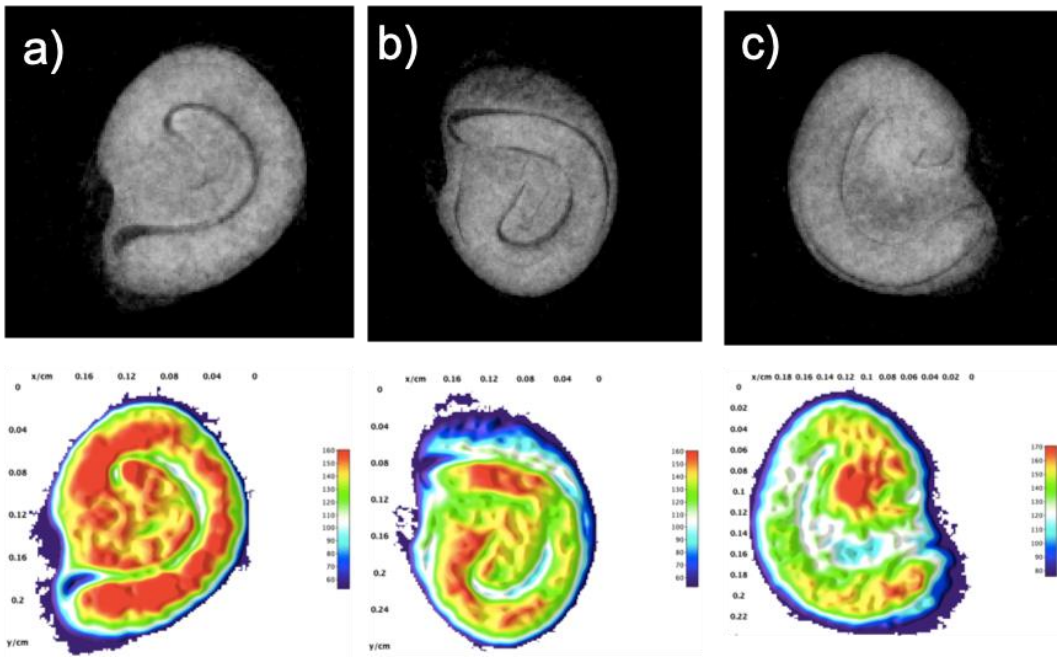

Figura 6. Imagens radiográficas de sementes de tomate condicionadas com: a) PEG + nanopartículas de ZnO; b) condicionadas com PEG; c) não condicionadas combinadas com representações em 3D da densidade ao longo da semente.

Quando essas áreas de alta densidade se distribuíram de forma homogênea por toda a semente, a densidade relativa manteve-se elevada. Por outro lado, sementes com tecidos de menor integridade apresentaram densidade relativa reduzida, resultado da menor resistência à passagem dos raios X. Isso se refletiu na formação de zonas mais translúcidas ou escurecidas nas radiografias, representadas pelas cores azul e roxa.

Na Figura 6, ainda é possível verificar a representação do gradiente de cor obtido por meio da densidade. No tratamento com PEG, há maior densidade na região radicular do eixo embrionário, possivelmente associada à intensificação da atividade de divisão celular promovida pelo condicionamento, em comparação ao controle. Na região dos cotilédones, a densidade foi superior nos tratamentos controle e PEG + ZnO. No controle, essa maior densidade pode ser atribuída à presença de maiores quantidades de reservas ainda não mobilizadas para o embrião. No tratamento PEG + ZnO, a elevada densidade observada em todo o embrião, associada à menor densidade nos cotilédones, pode indicar mobilização de reservas durante o condicionamento, favorecendo tanto o desenvolvimento embrionário. Tal resposta pode estar relacionada à atuação das nanopartículas de ZnO, que possivelmente estimularam o metabolismo celular, resultando em uma elevada taxa metabólica. A ação do zinco durante o processo de germinação, em formato de nanopartícula, age em diversas estruturas e processos metabólicos da semente que vão levar à multiplicação celular para desenvolvimento do embrião (Hoe et al, 2018).

Vale destacar que a macro *PhenoXray* foi originalmente desenvolvida para fenotipagem de alto rendimento, permitindo medições rápidas e totalmente automatizadas de parâmetros morfométricos e de densidade tecidual em sementes (Medeiros et al., 2020a). Assim, a aplicação na avaliação do condicionamento fisiológico representa uma ampliação das funcionalidades dessa tecnologia.

Análises fisiológicas

Não houve diferença entre tratamentos osmocondicionantes dos atributos fisiológicos das sementes de tomate relacionados a germinação, tempo médio para 50% de germinação, uniformidade de germinação, sincronia e incerteza, no entanto, há diferença dessas variáveis em relação ao nível de déficit hídrico (Tabela 1), sob temperatura de 25 ºC. Sem déficit hídrico há maior germinação (81%) e com menor tempo para atingir 50% desta.

O déficit hídrico durante a embebição das sementes causa reduções na velocidade de hidratação dos tecidos e na difusão de oxigênio, atraso no início da atividade enzimática, redução do crescimento meristemático, problemas no alongamento celular, síntese da parede e emissão da radícula (Obroucheva et al., 2017).

Tabela 1. Atributos fisiológicos de sementes de tomate submetidas a diferentes tratamentos osmocondicionantes e déficit hídrico na temperatura de 25 ºC.

Osmocondicionamento								
Tratamento	**G**	**T50**	**UnifG**	**Sinc**	**Inc**	**Ef**	**TME**	**Unif**
Controle	46 a	10,85 a	4,16 a	0,17 a	1,78 a	86 a	11,56 a	949 ab
PEG	49 a	10,48 a	4,23 a	0,38 a	1,72 a	88 a	9,97 b	928 b
PEG + ZnO	46 a	11,52 a	4,20 a	0,27 a	1,85 a	81 a	9,86 b	959 a
Déficit hídrico								
Com déficit	13 b	13,49 b	0,63 b	0,39 a	0,78 a	82 a	9,65 a	969 a
Sem déficit	81 a	8,41 a	7,76 a	0,15 b	2,79 b	88 a	11,25 b	921 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância. G: germinação (%); T50: tempo para atingir 50% de germinação; UnifG: uniformidade de germinação; Sinc: sincronia; Inc: incerteza; Ef: emergência final (%); tempo médio de emergência (TME) e Unif: uniformidade de plântulas.

A uniformidade de germinação foi maior sem déficit hídrico. O índice de sincronia também se diferiu quanto ao nível de estresse hídrico, indicando que a germinação das sementes sem déficit não se espalhou no tempo. Sementes germinadas sob déficit hídrico apresentaram maior sincronia, indicando uma sobreposição dos eventos de germinação ao longo do tempo. Isso reflete maior concentração de germinação em um intervalo específico, acompanhada de maior incerteza na distribuição da frequência de germinação (Lavezo et al., 2015; Santos et al., 2016).

Em relação a emergência não houve diferença entre os tratamentos. O tempo médio de emergência das plântulas foi menor nos tratamentos osmocondicionantes, independentemente de ser com PEG ou PEG + ZnO. Em condições com déficit hídrico o tempo médio de emergência foi menor. O nanocondicionamento de sementes pode controlar muitos processos fisio-bioquímicos, como alterar a atividade do sistema de defesa e aumentar os níveis de antioxidantes e atividades enzimáticas, tornando as plantas mais vigorosas e resilientes aos desafios ambientais (Kasote et al., 2019). Adicionalmente, o zinco também atua aumentando a expressão de genes envolvidos na ativação de antioxidantes, além da produção de auxinas (Kumar et al, 2020). De modo geral, o osmocondicionamento expõe as sementes a baixos potenciais hídricos, o que permite a embebição parcial, ativando eventos de germinação como reparo e síntese de DNA e RNA, atividade respiratória, mobilização de reservas e síntese enzimática, mas sem a ocorrência de protrusão radicular. Assim, o osmocondicionamento promove maior uniformidade e sincronismo na germinação, bem como na emergência e desenvolvimento das plântulas (Farooq et a., 2019).

O nanocondicionamento com ZnO proporcionou maior uniformidade de plântulas. A uniformidade também foi maior em condições de déficit hídrico. Vale ressaltar que alta taxa de uniformidade não representam garantia de plântulas bem desenvolvidas, uma vez que plântulas pouco desenvolvidas podem apresentar alta taxa de uniformidade (Silva et al., 2019; Pereira et al., 2020). O uso de nanopartículas de ZnO auxilia na superação de déficit hídrico, melhora na germinação, crescimento e desenvolvimento radicular, contrariamente, altas doses podem ter efeito contrário devido ao estresse oxidativo (Włodarczyk et al., 2023; Amooaghaie et al., 2016) ao ocorrer internalização de alta concentração das nanopartículas de ZnO nas células.

As condições de déficit hídrico limitaram o vigor das plântulas em todas as variáveis analisadas quando comparadas as condições sem déficit, a 25 ºC (Tabela 2). Não houve emergência (inicial) de plântulas aos cinco dias após a semeadura em condições de déficit hídrico. O osmocondicionamento com PEG proporcionou maior emergência inicial de plântulas quando comparado aos demais tratamentos.

Tabela 2. Atributos fisiológicos de sementes de tomate submetidas a diferentes tratamentos osmocondicionantes e déficit hídrico na temperatura de 25 ºC.

Tratamento	**Ei**		**CPA**		**CR**		**CTP**	
	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD
Controle	0 aB	3,5 bA	1,6 aB	21,7 aA	0,23 bB	9,21 aA	1,8 aB	31,0 aA
PEG	0 aB	8,5 aA	4,5 aB	18,4 aA	0,87 aB	9,17 aA	5,4 aB	27,5 aA
PEG + ZnO	0 aA	2,5 bA	1,2 aB	10,4 bA	0,18 bB	6,58 bA	1,5 aB	16,9 bA
Tratamento	**CPA/CR**		**MS**		**Cresc**		**Vigor**	
	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD
Controle	0,10 aB	0,42 bA	9 aB	74 aA	36 aB	1046 aA	88 aB	866 aA
PEG	0,17 aB	0,50 bA	20 aB	68 aA	123 aB	1009 aA	142 aB	848 aA
PEG + ZnO	0,15 aB	0,64 aA	3 aB	86 aA	29 aB	696 bA	78 aB	630 bA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância. Ei: Emergência inicial (%); CPA: comprimento de parte aérea (mm); CR: comprimento de raiz (mm); CTP: comprimento total de plântula (mm); CPA/CR: razão entre parte aérea e radicular; MS: massa seca (mg); Cresc: crescimento; e Vigor, CD: com déficit hídrico, SD: sem déficit hídrico.

No entanto, o tamanho inadequado de nanopartículas, alta concentração e alta duração do condicionamento podem causar inibição da germinação e redução do desenvolvimento das plântulas, alterando seu metabolismo e estrutura celular (Dileep Kumar et al. 2020; Gross et al. 2020). Altas concentrações de nanopartículas de ZnO afetam a síntese de clorofila, causam o desenvolvimento de células anormais e danos à raízes e brotos pelo alto acúmulo no nessas estruturas (Amooaghaie et al., 2016; Laware & Raskar, 2014; Wang et al., 2016). O uso

adequado e seguro de nanopartículas no condicionamento de sementes é essencial não apenas para a agricultura, mas também para o meio ambiente e muitos outros setores industriais (Scott et al. 2018).

Na Tabela 3, os tratamentos condicionantes não se diferiram para a germinação, tempo médio para 50% de germinação, uniformidade de germinação, sincronia e incerteza. Contudo, houve diferença em relação aos níveis de déficit hídrico a 35 ºC. A seca é um grande estresse abiótico, regularmente associado ao calor excessivo, tornando a germinação lenta é vulnerável a estresses e resulta em crescimento atrofiado e errático de plântulas (Rhaman et al., 2022).

Tabela 3. Atributos fisiológicos de sementes de tomate submetidas a diferentes tratamentos osmocondicionantes e déficit hídrico na temperatura de 35 ºC.

Osmocondicionamento								
Tratamento	**G**	**T50**	**UnifG**	**Sinc**	**Inc**	**Ei**	**TME**	**MS**
Controle	36 a	12,59 a	1,26 a	0,36 a	0,66 a	2 a	8,6 a	19 ab
PEG	34 a	12,41 a	1,67 a	0,32 a	0,92 a	1 a	8,3 a	12 b
PEG + ZnO	38 a	12,39 a	1,52 a	0,39 a	0,99 a	2 a	10,8 a	24 a
Déficit hídrico								
Com déficit	4 b	13,41 a	0 b	0,13 b	0,53 b	0 b	7,7 a	3 b
Sem déficit	68 a	11,52 b	2,97 a	0,58 a	1,18 a	3 a	10,8 a	34 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância. G: germinação (%); T50: tempo para atingir 50% de germinação; UnifG: uniformidade de germinação; Sinc: sincronia; Inc: incerteza; Ei: emergência inicial (%); TME: tempo médio de emergência (dias); MS: massa seca (mg).

A germinação das sementes foi superior sem o déficit hídrico e com menor tempo para atingir 50% (T50). Já a sincronia foi maior, o que indica que houve sobreposição a germinação, ou seja, as sementes germinaram todas em um só período. É válido ressaltar que esses aspectos fisiológicos ocorreram em condições de estresse térmico, com temperatura de 35°C. Mesmo sem o déficit hídrico, houve alto grau de incerteza, demostrando que a temperatura também comprometeu o processo de germinação. A incerteza é uma medida que indica se o processo ocorreu ou não, sendo que um baixo valor de incerteza corresponde que a germinação está mais concentrada em um determinado tempo (Carvalho et al., 2015).

A emergência inicial foi comprometida, independentemente do nível do estresse, porém, houve maior emergência de plântulas sem o déficit hídrico, mas com o tempo médio de emergência não diferindo. A massa seca das plântulas foi maior quando as sementes foram condicionadas com as nanopartículas de ZnO e sem déficit hídrico. De acordo com Sharma et al. (2021) as nanopartículas aumentam a atividade de enzimas relacionadas a germinação e promovem rápida hidrólise das reservas, proporcionando maior translocação e acúmulo.

Em relação ao comprimento os melhores resultados no vigor foi observado quando as plântulas foram condicionadas com PEG e sem as condições de déficit hídrico (Tabela 4). O condicionamento com ZnO comprometeu o desenvolvimento radicular e o comprimento total das plântulas.

Tabela 4. Atributos de crescimento e vigor de sementes de tomate submetidas a diferentes tratamentos osmocondicionantes e déficit hídrico na temperatura de 35 ºC.

Osmocondicionamento						
Tratamento	**CR**	**CTP**	**CPA/CR**	**Unif**	**Cresc**	**Vigor**
Controle	11,2 b	22,9 a	3,76 a	862 a	1076 b	834 b
PEG	14,1 a	17,9 b	2,25 a	820 a	1363 a	1048 a
PEG + ZnO	6,4 c	13,0 c	2,16 a	914 a	642 c	530 c
Déficit hídrico						
Com déficit	4,5 b	5,8 b	1,24 b	877 a	419 b	332 b
Sem déficit	16,6 a	30,1 a	4,21 a	854 a	1635 a	1277 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância. CR: comprimento de raiz (mm); CTP: comprimento total de plântula (mm); CPA/CR: razão entre parte aérea e radicular; Unif: uniformidade de plântulas; Cresc: crescimento; e Vigor.

A razão entre a parte aérea e raiz foi maior sem o déficit hídrico, o que representa uma maior taxa de crescimento, refletindo-se em maior dinâmica das raízes. A rápida regeneração das raízes pode ser vantajosa em ambientes adversos, nos quais a eficiência na captura de recursos é provavelmente maximizada pela redução da longevidade das raízes, aumentando a capacidade de absorção e reduzindo os custos de manutenção (Behling et al. 2018; Pinheiro et al., 2016).

Na uniformidade das plântulas não foi verificado diferença entre os tratamentos e níveis de estresse. Já os índices de crescimento e de vigor foram menores quando as sementes foram condicionadas com PEG + ZnO de acordo com a concentração testada. Efeitos tóxicos do condicionamento com nanopartículas mostraram redução da emergência de plântulas, redução do número de plântulas, decréscimo do crescimento de raízes e caules e atraso na floração, finalmente, reduzindo o rendimento (Hayes et al. 2020; Pelegrino et al. 2020). Entretanto, Rhaman et al. (2022) relataram efeitos benéficos, os quais, o condicionamento com nanopartículas, modulou o metabolismo da semente, aumento a absorção de água, a taxa de hidrólise, afrouxamento da parede celular, enfraquecimento do endosperma, rápido crescimento do embrião e desenvolvimento da raiz.

Em condições de déficit também houve redução do crescimento e do vigor a 35 ºC (Tabela 4). É importante ressaltar que água promove o crescimento do eixo embrionário, sendo

o veículo responsável pela translocação e transporte das reservas (Marcos-Filho, 2015b; Obroucheva et al., 2017; Silveira et al., 2023).

Mesmo sob altas temperaturas (35 ºC) houve uma alta porcentagem de emergência final de plântulas sem déficit hídrico, não havendo distinção entre os tratamentos de condicionamento (Tabela 5).

Tabela 5. Atributos fisiológicos de sementes de tomate submetidas a diferentes tratamentos osmocondicionantes e déficit hídrico na temperatura de 35 ºC.

Tratamento	**Ef**		**CPA**	
	CD	SD	CD	SD
Controle	59 bB	91 aA	1,5 aB	12,03 aA
PEG	79 aA	90 aA	2,27 aB	15,35 aA
PEG + ZnO	30 cB	78 aA	0,31 bB	12,89 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância. Ef: emergência final (%); CPA: comprimento de parte aérea (mm). CD: com déficit hídrico, SD: sem déficit hídrico.

No condicionamento com PEG houve maior emergência de plântulas com déficit hídrico, enquanto, o nanocondicionamento com ZnO apresentou pior desempenho nessas condições. A emergência de plântulas foi superior nas condições sem déficit hídrico em comparação àquelas submetidas ao déficit.

No comprimento de parte aérea, o nanocondicionamento com ZnO, apresentou menor desenvolvimento das plântulas em condições de déficit hídrico a 35 ºC. No entanto, sem condições de déficit hídrico não foram verificadas diferenças entre os tratamentos condicionantes. Ao comparar os níveis de déficit hídrico, houve maior crescimento da parte aérea, sem déficit.

A análise de componentes principais e correlação de Pearson podem ser verificados na Figura 7. Pela análise de componentes principais (PCA), pode-se observar que os componentes 1 (PC1) e 2 (PC2) explicaram, respectivamente, 84,08% e 6,06 %, da variabilidade total dos dados, para as variáveis analisadas a 25 ºC.

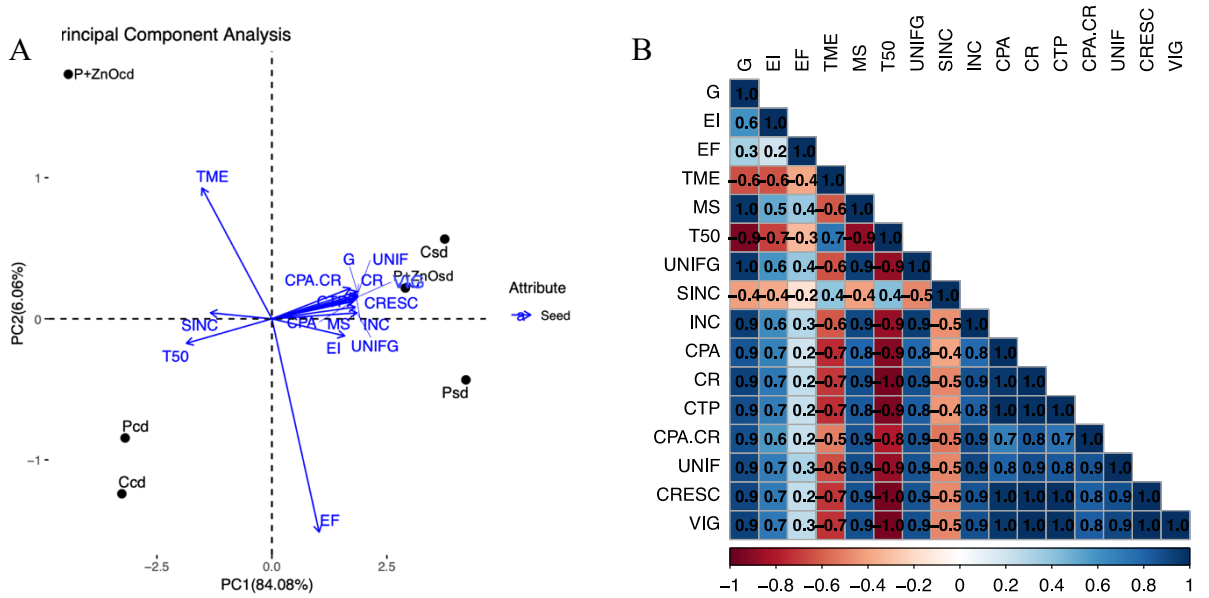

Figura 7. Análise de componentes principais (PCA) (A) e matriz de correlação de Pearson (B) das variáveis estudadas a 25 ºC para os tratamentos P+ZnOcd (PEG+ZnO sob déficit hídrico); Pcd (PEG sob déficit hídrico); Ccd (Controle sob déficit hídrico); P+ZnOsd (PEG+ZnO sem déficit hídrico); Psd (PEG sem déficit hídrico); Csd (Controle sem déficit hídrico). SINC: sincronia; T50: tempo para 50% de germinação; UnifG: uniformidade de germinação; INC: incerteza; Ei: emergência inicial (%); Ef: emergência final (%); TME: tempo médio de emergência (dias); CPA: Comprimento parte aérea; MS: massa seca (mg); CRESC: Crescimento; CTP: Comprimento total de plântulas; CPA.CR: Razão comprimento parte aérea e radicular; G: Germinação; UNIF: Uniformidade de plântulas; CR: Comprimento radicular; VIG: Vigor; PC1: Componente principal 1; PC2: Componente principal 2.

A PCA auxilia na interpretação das variáveis relacionadas a qualidade das sementes pela associação das variáveis estudadas (Medeiros et al., 2020). Tendo o PC1 e o PC2 explicado 90.14%, total da variabilidade dos dados. As variáveis CPA.CR, UNIF, G, CR, VIG, CRESC, INC, UNIFG, MS e CPA podem contribuir para a compreensão do maior vigor das sementes, visto que se posicionaram próximas no mesmo quadrante para os tratamentos Csd, Psd e P+ZnOsd (sem déficit hídrico). Observa-se, ainda, que a nanopartícula não apresentou efeito no aumento da qualidade fisiológica das sementes.

O tratamento P+ZnOcd apresentou o menor escore no componente principal 1 (PC1), estando mais fortemente correlacionado ao tempo médio de emergência (TME), evidenciando a influência negativa do déficit hídrico sobre o estabelecimento das plântulas. Na ausência de estresse hídrico, a 25 ºC, o tratamento Psd destacou-se na análise do PC1. Já no componente principal 2 (PC2), a variável eficiência de emergência (Ef) apresentou maior peso, indicando que, na dose estudada, as nanopartículas de ZnO não foram eficazes na mitigação do déficit hídrico. Por outro lado, observou-se efeito benéfico do osmocondicionamento na ausência de

estresse hídrico. A matriz de correlação revelou associações positivas significativas (r > 0,7) entre as variáveis G, MS, UNIFG, INC, CPA, CR, CTP, CPA.CR, UNIF, CRESC e VIG. Em contrapartida, as variáveis TME, SINC, EF e EI apresentaram correlações muito baixas, corroborando os resultados da análise de componentes principais (PCA), e demonstrando que essas variáveis não influenciaram diretamente o desenvolvimento das plântulas, mas serviram como indicadoras de maior vigor sob temperatura de 25 ºC.

A 35 ºC, os componentes principais 1 (PC1) e 2 (PC2) explicaram conjuntamente 94,64% da variabilidade dos dados (Figura 8). No PC1, as variáveis UNIF, G, CR, VIG, CRESC, INC, UNIFG, MS, CTP, SINC, EI e CPA contribuíram significativamente para a caracterização do vigor das sementes. Já Ef e TME foram as variáveis que mais se destacaram por diferenciar os tratamentos. Os tratamentos Csd e Psd apresentaram melhor desempenho geral, enquanto o tratamento P+ZnOsd ocupou posição inferior em relação aos demais.

O tratamento Ccd apresentou o menor escore no PC1, evidenciando desempenho inferior. Notavelmente, o tratamento P+ZnOcd foi posicionado de forma isolada no gráfico da PCA, indicando um comportamento distinto dos demais. Na ausência de déficit hídrico a 35 ºC, o tratamento Psd foi o que apresentou maior destaque no PC1. Por outro lado, o tratamento P+ZnOsd apresentou maior tempo médio de emergência (TME), enquanto Pcd e Ccd evidenciaram maiores escores de T50 e CPA.CR.

Não foi observada mitigação efetiva dos efeitos do estresse abiótico nas sementes de tomate com a utilização de nanopartículas de ZnO na dose estudada. No entanto, o osmocondicionamento, mesmo em condições sem déficit hídrico, promoveu efeitos benéficos sobre a qualidade fisiológica das sementes.

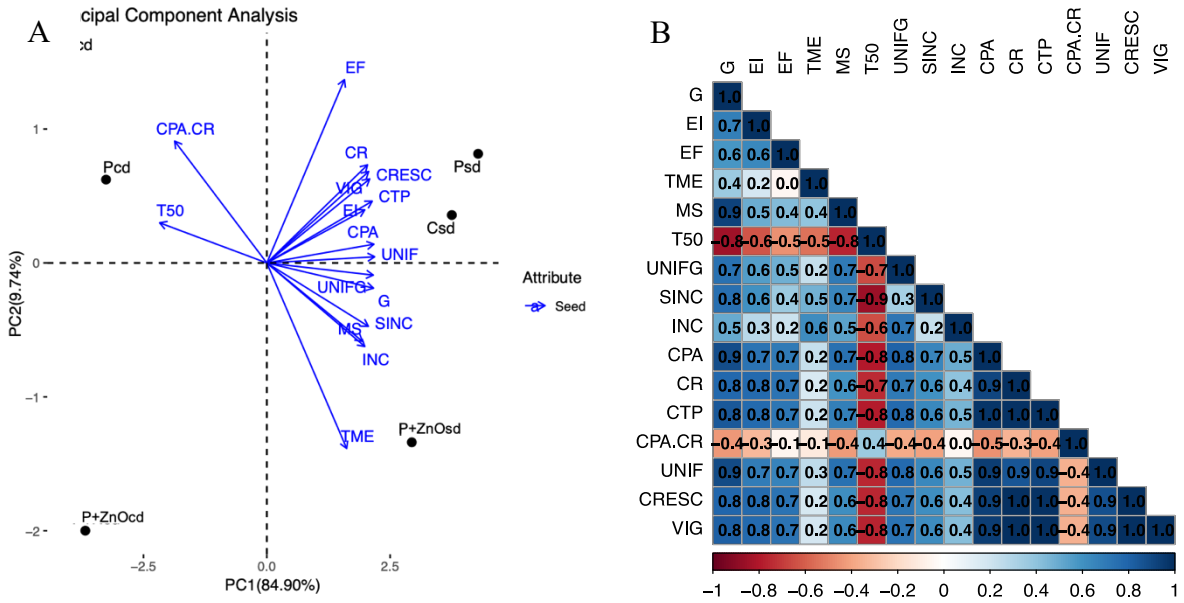

Figura 8. Análise de componentes principais (PCA)(A) e matriz de correlação de Pearson (B) das variáveis estudadas a 35 ºC para os tratamentos P+ZnOcd (PEG+ZnO sob déficit hídrico); Pcd (PEG sob déficit hídrico); Ccd (Controle sob déficit hídrico); P+ZnOsd (PEG+ZnO sem déficit hídrico); Psd (PEG sem déficit hídrico); Csd (Controle sem déficit hídrico). SINC: sincronia; T50: tempo para 50% de germinação; UnifG: uniformidade de germinação; INC: incerteza; Ei: emergência inicial (%); Ef: emergência final (%); TME: tempo médio de emergência (dias); CPA: Comprimento parte aérea; MS: massa seca (mg); CRESC: Crescimento; CTP: Comprimento total de plântulas; CPA.CR: Razão comprimento parte aérea e radicular; G: Germinação; UNIF: Uniformidade de plântulas; CR: Comprimento radicular; VIG: Vigor; PC1: Componente principal 1; PC2: Componente principal 2.

Na matriz de correlação (Figura 8), observaram-se associações positivas expressivas (r > 0,7) entre variáveis relacionadas ao crescimento e à uniformidade. As variáveis TME, MS e Ef apresentaram correlações mais baixas. As demais variáveis com maior correlação concentraram-se no mesmo quadrante da análise de componentes principais, corroborando os padrões observados.

O condicionamento de sementes com nanopartículas é uma ferramenta promissora que pode ser empregada para promover o sucesso da produção agrícola e tornar a agricultura mais sustentável. Pode ainda auxiliar a melhorar o crescimento das plantas e mitigar estresses abióticos, consequentemente, garantindo incrementos de produtividade e qualidade dos alimentos. No entanto, deve ser necessária a devida atenção para selecionar a dose e a duração do condicionamento das sementes.

4. CONCLUSÕES

Ocorreram alterações físicas nas sementes de tomate com o condicionamento com nanopartículas de ZnO.

O potencial fisiológico das sementes de tomate foi comprometido com o condicionamento com nanopartículas de ZnO.

O nanocondicionamento com partículas de ZnO na concentração testada não mitigou os efeitos causados pelo déficit hídrico e térmico nas sementes de tomate.

A utilização de osmocondicionamento pode promover aumento de vigor nas sementes.

5. REFERÊNCIAS

ABUD, H. F.; CICERO, S. M.; GOMES JUNIOR, F. G. Radiographic images and relationship of the internal morphology and physiological potential of broccoli seeds. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, e34950, 2018. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.34950

AMOOAGHAIE, R.; NOROUZI, M.; SAERI, M. Impact of zinc and zinc oxide nanoparticles on the physiological and biochemical processes in tomato and wheat. **Botany**, v. 95, n. 5, p. 441–455, maio 2017. https://doi.org/10.1139/cjb-2016-0194

AYGÜN, A.; GÜLBAĞÇA, F.; NAS, M. S.; ALMA, M. H.; ÇALIMLI, M. H.; USTAOĞLU, B.; ALTUNOĞLU, Y. C.; BALOĞLU, M. C.; CELLAT, K.; SEN, F.; et al. Biological synthesis of silver nanoparticles using Rheum Ribes and evaluation of their anticarcinogenic and antimicrobial potential: a novel approach in phytonanotechnology. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, v. 179, fev. 2020, p. 113012. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.113012

BARAN, M. F.; ACAY, H.; KESKIN, C. Determination of antimicrobial and toxic metal removal activities of plant-based synthesized (*Capsicum annuum* L. Leaves), ecofriendly, gold nanomaterials. **Global Challenges**, v. 4, n. 5, maio 2020, p. 1900104. https://doi.org/10.1002/gch2.201900104

BEHLING, M.; FELIPE, R. T. A.; FARIAS, J. B.; CARVALHO, G. D.; NEVES, J. C. L. Relações entre parte aérea e raízes em povoamentos de teca. **Revista Ceres**, v. 65, n. 6, p. 463–473, 2018. https://doi.org/10.1590/0034-737x201865060001

BIANCHINI, V.J.M; MASCARIN, G.M.; SILVA, L.C.A.S.; ARTHUR, V. CARSTENSEN, J.M.; BOELT, B.; SILVA, C.B. Multispectral and X-ray images for characterization of *Jatropha curcas* L. seed quality. **Plant Methods**, [S.l.], v. 17, n. 9, p. 1-15, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s13007-021-00709-6

BORGES, S. R. S.; SILVA, P. P.; ARAÚJO, F. S.; SOUZA, F. F. J.; NASCIMENTO, W. M. Tomato seed image analysis during the maturation. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 1, p. 22-31, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n1191888

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para Análise de Sementes. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399p.

CARVALHO, F. J.; AGUIAR, L. M.; ALMEIDA, L. F. V. Análise de germinação em variedades de rabanete. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 21, p. 60, 2015.

CHENG, J.; CHENG, X.; WANG, L.; HE, Y.; AN, C.; WANG, Z.; ZHANG, H. Physiological characteristics of seed reserve utilization during the early seedling growth in rice. **Brazilian Journal of Botany**, v. 38, p. 751–759, 2015. https://doi.org/10.1007/s40415-015-0190-6

DEMILLY, D.; DUCOURNAU, S.; WAGNER, M. H.; DÜRR, C. Digital imaging of seed germination. In: GUPTA, S. D.; IBARAKI, Y. (Eds.). **Plant Image Analysis: Fundamentals and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 147–164. https://doi.org/10.1201/b17441-8

DÍAZ-CRUZ, C.; NUÑEZ, H.; ESPINOZA-GÓMEZ, F.; FLORES-LÓPEZ, L. Z. Effect of molecular weight of PEG or PVA as reducing-stabilizing agent in the green synthesis of silver nanoparticles. **European Polymer Journal**, v. 83, 2016. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2016.08.25. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.08.025

DILEEP KUMAR, G.; RAJA, K.; NATARAJAN, N.; GOVINDARAJU, K.; SUBRAMANIAN, K. S. Invigouration treatment of metal and metal oxide nanoparticles for improving the seed quality of aged chilli seeds (*Capsicum annum* L.). **Materials Chemistry and Physics**, v. 242, fev. 2020, p. 122492. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122492

DONIA, D. T., CARBONE, M. Seed priming with zinc oxide nanoparticles to enhance crop tolerance to environmental stresses**. International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 24, p. 17612, 2023. https://doi.org/10.3390/ijms242417612

EDMOND, J. B.; DRAPALA, W. J. The effects of temperature, sand and soil, and acetone on germination of okra seed. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 71, p. 428–434, 1958.

EL-BADRI, A. M.; ALI, H. E.; ABD EL-MONEIM, A.; ALI, F. A.; ISMAIL, A. H.; ABOUL-EININ, H. Y.; et al. Selenium and zinc oxide nanoparticles modulate the molecular and morpho-physiological processes during seed germination of *Brassica napus* under salt stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 225, 2021, p. 112695. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112695

FAROOQ, M.; BASRA, S. M. A.; AHMAD, N.; HAFEEZ, K. Thermal hardening: a new seed vigor enhancement tool in rice. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 47, n. 2, p. 187–193, 2005. https://doi.org/10.1071/CP18604

FAROOQ, M.; USMAN, M.; NADEEM, F.; REHMAN, H.; WAHID, A.; BASRA, S. M. A.; SIDDIQUE, K. H. M. Seed priming in field crops: potential benefits, adoption and challenges. **Crop and Pasture Science**, v. 70, n. 9, p. 731–771, 2019. https://doi.org/10.1071/CP18604. https://doi.org/10.1071/CP18604

GROSS, M. S.; BEAN, T. G.; HLADIK, M. L.; RATTNER, B. A.; KUIVILA, K. M. Uptake, metabolism, and elimination of fungicides from coated wheat seeds in Japanese quail (*Coturnix japonica*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, p. 1514–1524, 2020. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b05668

HAHSLER, M., BUCHTA, C., AND HORNIK, K., (2020). Seriation: Infrastructure for Ordering Objects Using Seriation. **R package version 1.2-9**. https://CRAN.R-project.org/package=seriation

HAYES, K. L.; MUI, J.; SONG, B.; SANI, E. S.; EISENMAN, S. W.; SHEFFIELD, J. B.; KIM, B. Effects, uptake, and translocation of aluminum oxide nanoparticles in lettuce: a comparison study to phytotoxic aluminum ions. **Science of the Total Environment**, v. 719, 2020, p. 137393. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137393

HOE, P.T., N.C. MAI, L.Q. LIEN, N.K. BAN, C.V. MINH, N.H. CHAU, N.Q. BUU, D.T. HIEN, N.T. VAN, L.T.T. HIEN AND T.M. LINH, 2018. Germination responses of soybean seeds under Fe, ZnO, Cu and Co nanoparticle treatments. **Int. J. Agric. Biol**., 20: 1562–1568

HONG, Suk-Ju et al. Application of X-Ray imaging and convolutional neural networks in the prediction of tomato seed viability. **IEEE** Access, v. 11, p. 38061-38071, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3265998

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. **Estatística da Produção Agrícola**. IBGE, 2025.

JANATA, B. S.; GROVER, S.; RAM, H.; BAATH, G. S. Seed priming: molecular and physiological mechanisms underlying biotic and abiotic stress tolerance. **Agronomy**, v. 14, p. 2901, 2024. https://doi.org/10.3390/agronomy14122901

JOHNSON, G. Seed vigor in sweet corn revisited. **Weekly Crop Update from UD Cooperative Extension**. University of Delaware, 12 maio 2017.

KAHN, M. N.; FU, C.; LI, J.; TAO, Y.; LI, Y.; HU, J.; CHEN, L.; KAHN, Z.; WU, H.; LI, Z. Seed nanopriming: how do nanomaterials improve seed tolerance to salinity and drought? **Chemosphere**, v. 310, 2023, p. 136911. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136911

KASOTE, D. M.; LEE, J. H. J.; JAYAPRAKASHA, G. K.; PATIL, B. S. Seed priming with iron oxide nanoparticles modulate antioxidant potential and defense-linked hormones in watermelon seedlings. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, p. 5142–5151, 2019. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06013

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. DE B.; GOMES-JUNIOR, F. G.; NAKAGAWA, J. Teste de vigor baseados em desempenho de plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. DE B.; MARCOS-FILHO, J. (eds.) Vigor de sementes: conceitos e testes. Londrina: **Abrates**, 2020. p. 79–140.

KUMAR, P. A review on seed priming techniques in field crops. **International Journal of Progressive Research in Science and Engineering** , *[S. l.]*, v. 1, n. 8, p. 86–91, 2020. Disponível em: https://journal.ijprse.com/index.php/ijprse/article/view/216. Acesso em: 5 jul. 2025.

LABOURIAU L.G.; VALADARES M.B. On the germination of seeds of *Calotropis procera*. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** v.48, p.174-186, 1976.

LATEF A.A.; ALHMAD M.F.; ABDELFATTAH K.E.; The possible roles of priming with ZnO nanoparticles in mitigation of salinity stress in lupine (*Lupinus termis*) plants. **Journal of Plant Growth Regulation**. 2017 Mar 1; 36(1):60–70. https://doi.org/10.1007/s00344-016-9618-x

LAVEZO, A.; BRAGA, L. F.; BATISTÃO, A. C.; BONFANTE, L. V. Estresse osmótico na germinação de sementes de *Petiveria alliacea* L. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 17, n. 4, p. 622–630, 2015. https://doi.org/10.1590/1983-084X/14_026

LAWARE, S.L. AND RASKAR, S. Influence of zinc oxide nanoparticles on growth, flowering and seed productivity in onion. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, 3, 874-881.2014.

LÊ, S., JOSSE, J. & HUSSON, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**. 25(1). pp. 1-18. https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01

MACHADO, T.P.M.;MEDEIROS, A.D.; PINHEIRO, D.T.; SILVA, L.J.; DIAS, D.C.F.S. Non-destructive identification of physical damage in mung bean (*Vigna radiata* L.) seeds by x-ray image analysis. **Biosci. J.,** Uberlândia, v. 36, n. 3, p. 932-941, May/June 2020 http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v36n3a2020-47783

MAHAJAN, S.; DAS, A.; SARDANA, H. K. Image acquisition techniques for assessment of legume quality. **Trends in Food Science and Technology**, v. 42, n. 2, p. 116–133, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.01.001

MAHAKAN, W.; SARMAH, A. K.; MAENSIRI, S.; THEERAKULPISUT, P. Nanopriming technology for enhancing germination and starch metabolism of aged rice seeds using phytosynthesized silver nanoparticles. **Scientific Reports**, v. 7, art. 8263, 2017. https://doi.org/10.1038/s41598-017-08669-5

MARCOS-FILHO, J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. Londrina: **ABRATES**, 2015. 660 p.

MARCOS-FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 363–374, 2015b. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0007

MEDEIROS, A. D.; MARTINS, M. S.; SILVA, L. J.; PEREIRA, M. D.; LEÓN, M. J. Z.; DIAS, D. C. F. S. X-ray imaging and digital processing application in non-destructive assessing of melon seed quality. **Journal of Seed Science**, v. 42, e202042005, 2020. https://doi.org/10.1590/2317-1545v42229761

MEDEIROS, A. D.; SILVA, L. J.; PEREIRA, M. D.; OLIVEIRA, A. M. S.; DIAS, D. C. F. S. High-throughput phenotyping of *brachiaria grass* seeds using free access tool for analyzing X-

ray images. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 2020a. https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190209

MEDEIROS, A.D.; ARAÚJO, J.O.; LEÓN, M.J.Z.; SILVA, L. J.; DIAS, D.C.F.S. Parameters based on X-ray images to assess the physical and physiological quality of *Leucaena leucocephala* seeds. **Ciência e Agrotecnologia**, v.42, n.6, p.643-652, 2018. http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542018426023318

MICHEL, B. E.; KAUFMANN, M. R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. **Plant Physiology**, v. 51, n. 5, p. 914–916, May 1973. https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914

NILE, H. S.; WANG, Y.; KIM, D. H.; KSHIRSAGAR, P. S.; SARAN, A. R.; GULAM, M.; JUNG, Y.; KEUM, Y. S. Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 20, 254, 2022. https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8

OBROUCHEVA, N. V.; SINKEVICH, I. A.; LITYAGINA, S. V.; NOVIKOVA, G. V. Water relations in germinating seeds. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 64, p. 625–633, 2017. https://doi.org/10.1134/S102144371703013X

PELEGRINO, M. T.; KOHATSU, M. Y.; SEABRA, A. B.; MONTEIRO, L. R.; GOMES, D. G.; OLIVEIRA, H. C.; ROLIM, W. R.; DE JESUS, T. A.; BATISTA, B. L.; LANGE, C. N. Effects of copper oxide nanoparticles on growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) seedlings and possible implications of nitric oxide in their antioxidative defense. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, art. 232, 2020. https://doi.org/10.1007/s10661-020-8188-3

PEREIRA, M. D.; REIS, J. A.; FERRARI, C. S.; VALE, A. M. P. G. Processamento digital de imagens de plântulas na avaliação do vigor de sementes de *Moringa oleifera* Lam. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 2, p. 291–306, 2020. https://doi.org/10.5902/1980509825750

PERIS, G. C. O.; PINHEIRO, D. T.; LIMÃO, M. A. R.; SOUZA, L. R.; RAMOS, R. M. A.; DIAS, D. C. F. S. Osmopriming and its relationship with the quality of *Urochloa decumbens* seeds under water deficit. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 11, n. 1, e8288, jan./mar. 2024. https://doi.org/10.32404/rean.v11i1.8288

PINHEIRO, R. C.; DE DEUS, J. C.; NOUVELLON, Y.; CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; ALÓ, L. L.; GUERRINI, I. A.; JOURDAN, C.; LACLAU, J. P. A fast exploration of very deep soil layers by *Eucalyptus* seedlings and clones in Brazil**. Forest Ecology and Management**, v. 366, p. 143–152, 2016. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.012.

PLAKSENKOVA, Ilona et al. The impact of zinc oxide nanoparticles on cytotoxicity, genotoxicity, and mirna expression in barley (*hordeum vulgare* l.) seedlings. **The Scientific World Journa***l*, v. 2020, Article ID 6649746, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2020/6649746

PRIMACK, R. B. Variation in the phenology of natural populations of montane shrubs in New Zealand. **Journal of Ecology**, v. 68, n. 3, p. 849–862, 1980. https://doi.org/10.2307/2259460

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R **Foundation for Statistical Computing**, 2022. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: jul. 2025.

RAHIMI, D.; KARTOOLINEJAD, D.; NOURMOHAMMADI, K.; NAGHDI, N. Increasing drought resistance of *Alnus subcordata* C.A. Mey. seeds using a nano priming technique with multi-walled carbon nanotubes. **Journal of Forest Science**, v. 62, n. 6, p. 269–278, 2016. https://doi.org/10.17221/15/2016-JFS

RAHMAN, A.; CHO, B. K. Assessment of seed quality using non-destructive measurement techniques: a review. **Seed Science Research**, v. 26, n. 4, p. 285–305, 2016. https://doi.org/10.1017/S0960258516000234

RHAMAN, M. S.; TANIA, S. S.; IMRAN, S.; MAHMUD, A.; ISLAM, M. S.; ISLAM, M. R.; ISLAM, S. Seed priming with nanoparticles: an emerging technique for improving plant growth, development, and abiotic stress tolerance. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 4047–4062, 2022. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01007-3

SANTOS, M. A. C.; REGO, M. M.; QUEIROZ, M. A.; DANTAS, B. F.; OTONI, W. C. Synchronizing the in vitro germination of *Psidium guineense* Sw. seeds by means of osmotic priming. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 649–660, 2016. https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400008

ŠARIĆ, A., VRANKIĆ, M., LÜTZENKIRCHEN-HECHT, D., DESPOTOVIĆ, I., PETROVIĆ, Z., DRAŽIĆ, G., ECKELT, F. Insight into the growth mechanism and photocatalytic behavior of tubular hierarchical ZnO structures: an integrated experimental and theoretical approach. **Inorganic chemistry**, v. 61, n. 6, p. 2962-2979, 2022. https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c03905

SAVASSA, S. M.; LIMA, C. E. P.; SILVA, R. V.; MOURA, M. R.; DANTAS, A. C.; DANTAS, J. P. Effects of ZnO nanoparticles on *Phaseolus vulgaris* germination and seedling development determined by X-ray spectroscopy. **ACS Applied Nano Materials**, v. 1, n. 11, p. 6414–6422, 2018. https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01619

SCOTT, N. R.; CHEN, H.; CUI, H. Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, p. 6451–6456, 2018. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00964

SEMBADA, A. A.; LENGGORO, I. W. Nanopriming of tomato (*Solanum lycopersicum*) seeds against heavy metal stress during germination and seedling formation. **BIO Web of Conferences**, v. 91, p. 01005, 2024. https://doi.org/10.1051/bioconf/20249101005

SHARMA, D., AFZAL, S., SINGH, N.K. Nanopriming with phytosynthesized zinc oxide nanoparticles for promoting germination and starch metabolism in rice seeds. **Journal of Biotechnology** 336 (2021) 64–75

SILVA, A. C. A.; SANTOS, A. B.; ARAÚJO, J. C. M.; MEDEIROS, L. R.; MACEDO, M. C. Biocompatibilidade de semicondutores dopados, nanocristais e nanocompósitos. In: CELIK, T. A. (org.). Citotoxicidade. Londres: **InTech**, 2018. p. 149–161.

SILVA, J. A.; PINTO, T. L. F.; LIMA, M. R.; FERREIRA, A. P. Seed quality analysis of *Senna siamea* Lam. using image analysis techniques. **Journal of Seed Science**, v. 42, e202042042, 2020. https://doi.org/10.1590/2317-1545v42241633

SILVA, L. J.; MEDEIROS, A. D.; OLIVEIRA, A. M. S. SeedCalc: a new automated R software tool for germination and seedling length data processing. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 2, p. 250–257, 2019. https://doi.org/10.1590/2317-1545v42n2217267

SILVA, M. F.; CAVALCANTE, M. Z. B.; SOUZA, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; SANTOS, C. M. D. Near infrared spectroscopy for the classification of vigor level of soybean seed. **Revista Ciência Agronômica**, v. 55, p. 20238703, 2024. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20240005

SILVA, P. P.; LIMA, A. C. S.; SANTOS, R. F. S.; FONSECA, C. L. T.; NASCIMENTO, R. D. S. V. Análise de imagens no estudo morfológico e fisiológico de sementes de abóbora. **Horticultura Brasileira**, v. 32, p. 210–214, 2014. https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000200016

SILVEIRA, A. S.; PINHEIRO, D. T.; OLIVEIRA, R. M.; DIAS, D. C. F. S.; SILVA, L. J. Osmopriming with selenium: physical and physiological quality of tomato seeds in response to water deficit. **Journal of Seed Science**, v. 45, e202345012, 2023. https://doi.org/10.1590/2317-1545v45267349

SINGH, D.; SINGH, M.; SHARMA, S.; PRAKASH, P.; KUMAR, R.; YADAV, S. K.; CHAUHAN, A. One-pot green synthesis and structural characterisation of silver nanoparticles using aqueous leaves extract of Carissa carandas: antioxidant, anticancer and antibacterial activities. **IET Nanobiotechnology**, v. 12, n. 6, p. 748–756, set. 2018. https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2017.0261

VILLELA, F. A.; FILHO, D. L.; SEQUEIRA, E. L. Tabela de potencial osmótico em função da concentração de polietilenoglicol 6.000 e da temperatura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 11/12, p. 1957–1968, nov./dez. 1991.

WANG, X. et al. Zinc oxide nanoparticles affect biomass accumulation and photosynthesis in *Arabidopsis*. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 12 jan. 2016. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01243

WAQAS MAZHAR, M.; ISHTIAQ, M.; HUSSAIN, I.; PARVEEN, A.; HAYAT BHATTI, K.; AZEEM, M.; THIND, S.; AJAIB, M.; MAQBOOL, M.; SARDAR, T.; MUZAMMIL, K.; NASIR, N. Seed nano-priming with zinc oxide nanoparticles in rice mitigates drought and enhances agronomic profile. **PLoS ONE**, v. 17, e0264967, 2022. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264967

WŁODARCZYK, K.; SMOLIŃSKA, B.; MAJAK, I. The antioxidant potential of tomato plants *(Solanum lycopersicum* L.) under Nano-ZnO treatment. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 14, p. 11833, 1 jan. 2023. https://doi.org/10.3390/ijms241411833