

CRESCIMENTO DE MILHO SUBMETIDO A ESTRESSE SALINO E SEED PRIMING DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO

Lucyelly Dâmela Araújo Borborema¹, Ronaldo do Nascimento², Allesson Ramos de Souza³,
Anna Rebeca Silva Nóbrega³, Kheila Gomes Nunes³, Geovani Soares de Lima⁴

RESUMO: O estresse salino ocasionado pelo uso de águas salobras representa uma séria ameaça à agricultura, comprometendo de forma significativa a morfofisiologia e a produtividade das culturas. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o efeito do *seed priming* com nanopartículas de zinco no crescimento de plantas de milho, submetidas a estresse salino. Os tratamentos foram constituídos por dois níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (0,4 e 3,0 dS m⁻¹) e seis concentrações de nanopartículas de óxido de zinco (0; 50; 100; 150; 200 e 250 mg L⁻¹), distribuídos em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial de 2 x 6, com quatro repetições e uma planta por parcela. O uso de nanopartículas nas concentrações de 94 e 151 mg L⁻¹ mitigam o efeito deletério da salinidade na altura de planta e no diâmetro de caule, respectivamente, de plantas irrigadas com CEa de 3,0 dS m⁻¹. Por outro lado, a salinidade e as nanopartículas de zinco influenciaram negativamente a área foliar de plantas de milho aos 35 dias após a semeadura.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de sementes; estresse abiótico; atenuantes.

GROWTH OF MAIZE UNDER SALT STRESS AND SEED PRIMING WITH ZINC OXIDE NANO PARTICLES

ABSTRACT: Salt stress caused by the use of saline water represents a serious threat to agriculture, significantly compromising crop morphophysiology and productivity. In this context, the objective of this study was to evaluate the effect of seed priming with zinc nanoparticles on the growth of maize plants subjected to salt stress. The treatments consisted

¹ Msc. em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB. Fone: (83) 99954-2268. e-mail: lucyellyd@gmail.com.

² Prof. Doutor, Depto de Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande, PB.

³ Msc em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB.

⁴ Prof. Doutor, Depto de Agronomia, UFCG, Campus Pombal, PB.

of two levels of irrigation water electrical conductivity (0.4 and 3.0 dS m⁻¹) and six concentrations of zinc oxide nanoparticles (0, 50, 100, 150, 200, and 250 mg L⁻¹), arranged in randomized block design in a 2 × 6 factorial scheme, with four replications and one plant per plot. The use of nanoparticles at concentrations of 94 and 151 mg L⁻¹ mitigated the deleterious effects of salinity on plant height and stem diameter, respectively, in plants irrigated with water of 3.0 dS m⁻¹ electrical conductivity. On the other hand, both salinity and zinc nanoparticles negatively affected the leaf area of maize plants at 35 days after sowing.

Keywords: *Seed* treatment; abiotic stress; mitigating.

INTRODUÇÃO

O milho (*Zea Mays* L.) pertencente à família Poaceae originária da América Central, destaca-se por ser uma cultura adaptada a diferentes condições ambientais em regiões tropicais e temperadas (Richard et al., 2021). Atualmente, é amplamente cultivada em diversas regiões do mundo, destacando-se como um dos cereais mais importantes globalmente em termos de área cultivada e produção total (Kaul et al., 2019), respondendo a 52% da dieta humana de acordo com a FAO (2019). Entretanto, para garantir uma produção satisfatória, especialmente em regiões como o semiárido nordestino, é indispensável o uso da irrigação.

Contudo, essa região enfrenta diversos desafios, como a má distribuição das chuvas e fatores edafoclimáticos, que comprometem tanto a quantidade quanto a qualidade das fontes de abastecimento, que normalmente apresentam altas concentrações de sais solúveis, o que pode limitar a produtividade das culturas, através da redução do potencial osmótico do solo (Lima et al., 2022). Além disso, o uso contínuo da água salobra pode proporcionar o fechamento parcial dos estômatos, afetando o desenvolvimento das culturas, tornando-se crucial o uso de estratégias que atenuem os efeitos deletérios da salinidade na água de irrigação e/ou possibilitem a utilização dessas águas para a irrigação.

Um dos métodos utilizados como alternativa é o preparo de sementes (*seed priming*) com nanopartículas de óxido de zinco (NPZnO); tratamento capaz de penetrar no tegumento, movimentar-se pelos tecidos vasculares, sendo as nanopartículas absorvidas, translocadas e acumuladas nos diferentes tecidos ao longo do desenvolvimento da planta (Esper Neto et al., 2020). O zinco também exhibe propriedades antimicrobianas e atua no aumento da atividade antioxidante das plantas (Elhawat et al., 2018), que representa uma estratégia de liberação direcionada, voltada para aumentar a disponibilidade de micronutrientes essenciais durante as

fases iniciais do desenvolvimento das plantas e o seu uso pode aumentar e manter o crescimento de plantas de milho (Adhikari et al., 2015; Esper Neto et al., 2020).

Entretanto, na literatura, o impacto do NPZnO no crescimento de plantas sob estresse salino tem sido escassamente relatado e, dessa forma, objetivou-se avaliar o efeito do seed priming com nanopartículas de zinco no crescimento de plantas de milho, submetidas a estresse salino.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em ambiente protegido (casa de vegetação), localizado na Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no município de Campina Grande – PB, com coordenadas geográficas de 07°15'18" de latitude sul, 35°52'28" de longitude oeste e altitude média de 550 m.

O cultivo foi conduzido em vasos plásticos com capacidade de 10 L, adaptados com lisímetros de drenagem. Em cada vaso foi acoplado na sua base um dreno transparente de 20 mm de diâmetro, para permitir o escoamento da água drenada. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados, com arranjo fatorial 2×6 , sendo dois níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (0,4 e 3,0 dS m^{-1}) e seis concentrações de nano partículas de óxido de zinco (0; 50; 100; 150; 200 e 250 mg L^{-1}) com quatro repetições e uma planta por parcela.

As águas salobras foram preparadas mediante adição de sais NaCl, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ na água de abastecimento local ($\text{CEa} = 0,4 \text{ dS m}^{-1}$), mantendo a proporção equivalente de 7:2:1 de Na, Ca e Mg, respectivamente, que representa a composição média das águas do semiárido nordestino (Medeiros, 1992). No preparo das águas de irrigação, foi considerada a relação entre CEa e a concentração de sais (Richards, 1954), conforme Equação 1. A irrigação com água salobra iniciou-se aos 10 dias após a semeadura (DAS), realizada diariamente.

$$Q \approx \text{CEa} \times 10 \quad (1)$$

Onde: Q - quantidade de sais (mmolc L^{-1}); e

CEa - condutividade elétrica da água de irrigação (dS m^{-1}).

Inicialmente, foram escolhidas sementes vigorosas de milho da cultivar NTX 668 PRO2, desinfetadas com solução de hipoclorito de sódio (1%) por 2 minutos e, em seguida, lavadas diversas vezes com água destilada. A aplicação das nanopartículas de zinco (NPZnO) foram realizadas através do método de preparo das sementes (seed priming) de acordo com a metodologia proposta por Esper Neto et al (2020), em que as sementes foram inseridas em um béquer com 1L de água destilada, juntamente com cada concentração de NPZnO (0; 50; 100; 150; 200 e 250 mg L⁻¹). Ao longo de 8 horas, as sementes permaneceram emergidas na solução e a cada 1 hora era realizado a mistura da solução, para em seguida ficarem aptas para a semeadura.

Posteriormente, foi realizado a semeadura, utilizando-se de quatro sementes por vaso, distribuídas de forma equidistante, em uma profundidade padrão de \cong 3cm, sendo realizado o desbaste cinco dias após a semeadura.

As adubações com nitrogênio, fósforo e potássio foram realizadas conforme recomendação para experimentos em vaso, de acordo com Novais et al (1991). Os fertilizantes usados foram a ureia (45% N), fosfato monoamônico (12% N; 61% P₂O₅) e KCl (60% K₂O).

Aos 35 dias após a semeadura (DAS), foi determinada a altura de planta com o auxílio de uma fita métrica, medindo da base do colmo à extremidade onde encontra-se a gema apical; diâmetro de caule utilizando-se de um paquímetro; e área foliar determinada através da metodologia descrita por Benincasa (2003), em que uma amostra com área conhecida de 4 cm² foi retirada da folha e encaminhada para a estufa no intuito de obter a massa seca da amostra, posteriormente foi utilizada a Equação 2.

$$AFT=(\text{Área da amostra}\times\text{massa seca total})/(\text{massa seca da amostra}) \quad (2)$$

Os dados coletados foram submetidos ao teste de normalidade e homogeneidade (teste de Shapiro-Wilk e teste de Bartlett) e posteriormente à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$). Subsequente, nos casos de significância, as variáveis afetadas pela salinidade foram submetidas ao teste de comparação de médias (teste F), enquanto aquelas significativamente influenciadas pelas concentrações de nanopartículas de óxido de zinco e pela interação entre os dois fatores foi realizada uma análise de regressão polinomial linear e quadrática, utilizando-se o software estatístico SISVAR 5.6 (FERREIRA et al., 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve efeito significativo ($p \leq 0,01$) da interação entre os níveis da condutividade elétrica da água de irrigação e as concentrações de nanopartículas de óxido de zinco sobre a altura de planta e diâmetro de caule (Tabela 1). Os níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e as concentrações de nanopartículas de óxido de zinco, demonstraram efeito significativo para a área foliar das plantas de milho, aos 35 dias após a semeadura.

Tabela 1. Resumo da análise de variância para a altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC) e área foliar (AF) do milho em função da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação (CEa) e concentrações de nano partículas de óxido de zinco (NPZnO) aos 35 dias após a semeadura.

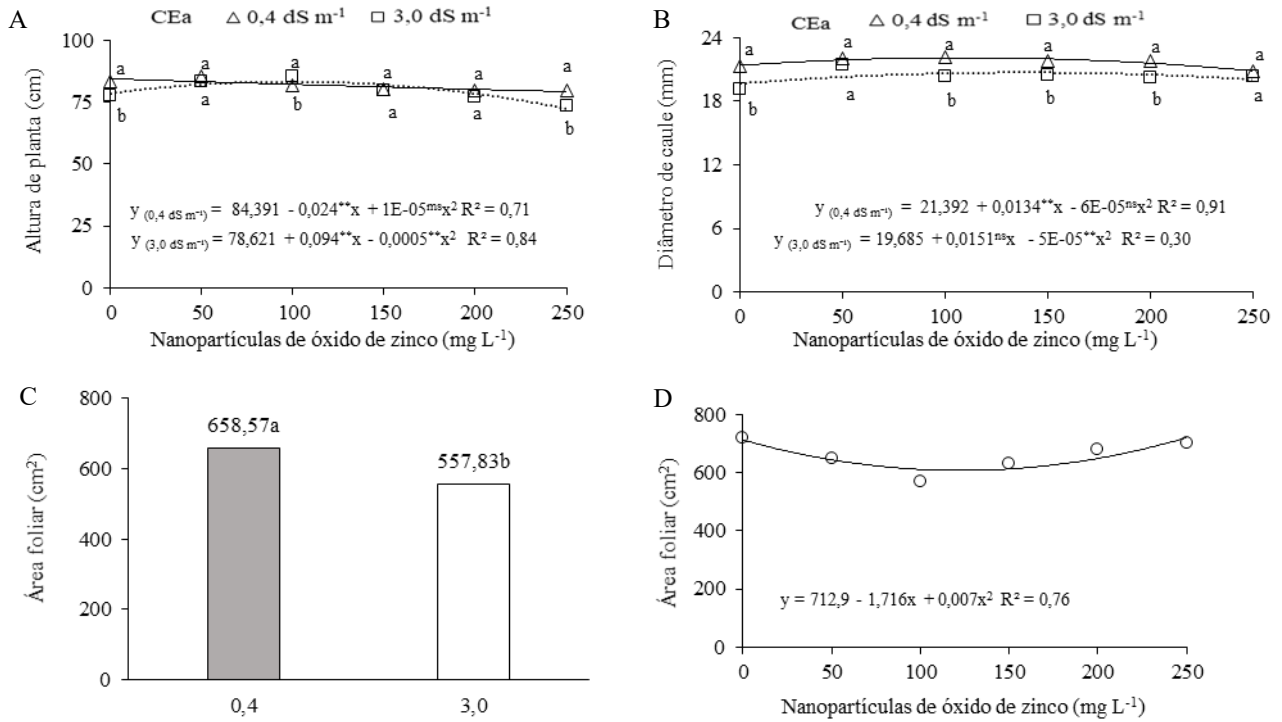
Fonte de variação	GL	Quadrados médios		
		AP	DC	AF
Condutividade elétrica da água de irrigação (CEa)	1	59,36**	50,99**	121796,43**
Concentrações de NPZnO	5	70,20**	2,22**	20393,55**
Regressão linear	1	182,88**	0,03 ^{ns}	13656,04*
Regressão quadrático	1	99,85*	6,37**	42517,29**
Interação (CEa× NPZnO)	5	27,28**	0,85**	4604,85 ^{ns}
Blocos	3	18,73 ^{ns}	0,46 ^{ns}	2013,16 ^{ns}
Resíduo	33	6,07	0,39	3689,33
CV (%)		3,06	2,98	9,99

GL - Grau de liberdade; CV - Coeficiente de variação; *, **, ns - Significativo a $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ e não significativo, respectivamente.

A salinidade na água de irrigação influenciou negativamente a AP do milho e plantas irrigadas com CEa de $0,4 \text{ dS m}^{-1}$ apresentaram um maior valor (84,39 cm) (Figura 1.A), resultando em uma redução por incremento unitário de 6,84% ao comparar com plantas irrigadas com $3,0 \text{ dS m}^{-1}$. Por outro lado, observa-se efeito positivo do NPZnO em plantas irrigadas com o maior nível salino ($3,0 \text{ dS m}^{-1}$) quando submetidos até a concentração de 94 mg L^{-1} de NPZnO, verificando-se incrementos de 5,62% (4,42 cm) ao comparar com plantas irrigadas com o mesmo nível salino, porém, sem o tratamento de sementes.

O aumento da salinidade na água de irrigação influenciou negativamente o DC (Figura 1.B), onde plantas de milho irrigadas com CEa de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ apresentaram um menor valor (19,68 mm), resultando um decréscimo de 8% (1,71 mm) ao comparar com plantas irrigadas com o menor nível salino ($0,4 \text{ dS m}^{-1}$). Os maiores valores para o DC observados sob CEa de $0,4$ e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ foram as plantas submetidas até as concentrações de $111,70$ e 151 mg L^{-1} de NPZnO, respectivamente, com médias de 22,14 e 20,83 mm.

Semelhante aos resultados obtidos, Adhikari et al. (2015) ao utilizar de NPZnO (<100nm) em plantas de milho, obtiveram como resposta uma melhora no crescimento das plantas, efeito este que pode estar associado a regulação da atividade da enzima nitrato redutase.



X e Y representam concentrações de nanopartículas de óxido de zinco (mg L⁻¹) e variáveis analisadas, respectivamente. ** e ns significativo a p ≤ 0,01 e não significativo respectivamente. Para mesma concentração nano partículas de óxido de zinco, as médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas entre os níveis de salinidade de água (CEa).

Figura 1. Altura de planta (A) e diâmetro do caule (B) de plantas de milho em função da interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação (CEa) e concentrações de nanopartículas de óxido de zinco (NPZnO), área foliar (C) em função dos níveis de CEa e área foliar (D) em função das concentrações de NPZnO das plantas de milho aos 35 dias após a semeadura.

Verificou-se efeito negativo da salinidade na água de irrigação para a AF (Figura 1.C), de modo que o aumento da salinidade ocasionou redução de 15,30% (100,74 cm²) para a variável. De forma isolada, o uso das concentrações de NPZnO até a concentração de 122,57 mg L⁻¹ proporcionou o menor valor (607,73 cm²) para a AF (Figura 1.D), sendo o maior valor (712,9 cm²) observado no tratamento controle (0 mg L⁻¹) em plantas de milho aos 35 dias após a semeadura.

A presença de sais de Na⁺ e Cl⁻ na água de irrigação e/ou no solo prejudica o desenvolvimento das plantas, com destaque para as fases de germinação, crescimento inicial e estabelecimento, que são as mais vulneráveis aos efeitos negativos do estresse salino (Nascimento et al., 2025).

No entanto, pesquisas mostraram que a aplicação de nanofertilizantes pode aumentar a concentração de vários fitohormônios, como ácido indol-3-acético, giberelinas, citocinas, ácido

abscísico, dentre outros (Hamid et al., 2021), e que ajudam no crescimento e desenvolvimento das plantas (Fasusi et al., 2021; Sumbul et al., 2020).

CONCLUSÕES

A salinidade na água de irrigação influencia negativamente o crescimento das plantas de milho. O uso de nanopartículas nas concentrações de 94 e 151 mg L⁻¹ mitigam o efeito deletério da salinidade na altura de planta e no diâmetro de caule, respectivamente, com CEa de 3,0 dS m⁻¹ nas plantas de milho aos 35 dias após a semeadura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARI, T.; KUNDU, S.; BISWAS, A. K.; TARAFDAR, J. C.; RAO, S. A. Characterization of Zinc Oxide Nano Particles and Their Effect on Growth of Maize (*Zea mays* L.) **Plant. Journal of Plant Nutrition**, v. 38, p. 1505-1515, 2015.

BENINCASA M. M. P. **Análise de crescimento de plantas, noções básicas**. 2 ed. Jaboticabal, FUNEP. 41p. 2003.

ELHAWAT, N.; ALSHAAL, T.; HAMAD, E.; EL-NAHRAWY, E.; OMARA, A.; EL-NAHRAWY, S.; ELSAKHAWY, T.; GHAZI, A.; ABDALLA, N.; DOMOKOS-SZABOLCSY, E.; HASSAN EL-RAMADY, H. **Nanoparticle-associated phytotoxicity and abiotic stress under agroecosystems. In Phytotoxicity of nanoparticles**, 1st ed.; Faisal, M., Saquin, Q., Alatar, A. A., Ak-Khedhairy, A. A., Eds.; Springer: Gewerbestrasse, Switzerland, 2018.

ESPER NETO, M.; BRITT, D. W.; LARA, L. M.; CARTWRIGHT, A.; SANTOS, R. F.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Initial Development of Maize Seedlings after Seed priming with Nanoscale Synthetic Zinc Oxide. **Agronomy**, v. 10, 307p, 2020.

FASUSI, O. A.; CRUZ, C.; BABALOLA, O. O. Agricultural sustainability: Microbial biofertilizers in rhizosphere management. **Agriculture**, v.11, e163, 2021.

Food and Agriculture Organization (2019). **The state of food security and nutrition in the world Food and Agriculture Organization of the United Nations**.

HAMID, B.; ZAMAN, M.; FAROOQ, S.; FÁTIMA, S.; SAYYED, R.; BABA, Z.; SHEIKH, T.; REDDY, M.; EL ENSHASY, H.; GAFUR, A.; NURIANI, N. L. Bacterial Plant Biostimulants: A Sustainable Way towards Improving Growth, Productivity, and Health of Crops. **Sustainability**, v,13, e2856, 2021.

KAUL, J.; JAIN, K.; OLAKH, D. An overview on role of yellow maize in food, feed and nutrition security. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 8, p. 3037-3048, 2019.

LIMA, G. S. DE; PINHEIRO, F. W. A.; GHEYI, H. R.; SOARES, L. A. DOS A.; SOUSA, P. F. N.; FERNANDES, P. D. Saline water irrigation strategies and potassium fertilization on physiology and fruit production of yellow passion fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 180-189, 2022.

MEDEIROS, J. F. **Qualidade de água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo GAT nos Estados de RN, PB e CE. 1992.** 196f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Paraíba Campina Grande, 1992.

NASCIMENTO, M. T. C. C. do; MEIRA, A. C. S.; SANTOS, J. S. dos. Água cinza e esterco bovino no cultivo de mudas de mamão. **Revista verde**, v. 1, 2025.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S. (ed). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa, 1991. p. 189-198.

RICHARD, K. ABDEL-RAHMAN, E. M.; SUBRAMANIAN, S.; NYASANI, J. O.; THIEL, M.; JOZANI, H. J.; BORGEMEISTER, C.; MUDERERI, B. T.; LANDMANN, T. Estimating maize lethal necrosis (MLN) severity in Kenya using multispectral high-resolution data. **Applied geomatics**, v. 13, p. 389-400, 2021.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: U. S. Department of Agriculture, 1954. 160p.

SUMBUL, A.; ANSARI, R. A; RIZVI, R.; MAHMOOD, I. A potential biofertilizer for soil and phytosanitary management. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 27, p. 3634-3640, 2020.