

EFEITO DE NANOPARTÍCULAS DE CARBONO NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE GRÃOS DO ARROZ IRRIGADO SUBMETIDO À ESTRESSE TÉRMICO

SHAIANE LESSA DOS SANTOS¹; LUANA VANESSA PERETTI MINELLO²;
LUANA BUENO LONGARAY³, NATAN FAGUNDES⁴; EDGARDO ANTONIO
BAZERGA GONZALEZ JÚNIOR⁵; RAUL ANTONIO SPEROTTO⁶

¹ Universidade Federal de Pelotas – shaianelessadossantos44@gmail.com

² Universidade Federal de Pelotas – lvpmminello@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas - buenolongaray@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Pelotas - natanfagundes@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Pelotas - edgarjunior967@hotmail.com

⁶ Universidade Federal de Pelotas – raulsperotto@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A agricultura tem buscado alternativas mais sustentáveis para manter a produtividade das lavouras, e ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais causados pelo uso excessivo de agroquímicos. Com as mudanças climáticas que causam distúrbios ambientais cada vez mais presentes, estratégias de utilização de bioinsumos, como os bioestimulantes, têm sido de grande destaque por contribuir para o crescimento e desenvolvimento das plantas de uma forma mais equilibrada.

A utilização de cianobactérias, como é o caso da *Spirulina platensis*, tem demonstrado muitos efeitos positivos no crescimento vegetal, nas atividades fotossintéticas e também no acúmulo de biomassa por meio da oferta de nutrientes, fitormônios e moléculas bioativas que são capazes de modular o metabolismo das plantas (SHEDEED et al., 2022). Além disso, cianobactérias como a *Spirulina*, foram destacadas como biofertilizantes sustentáveis com potencial para o melhoramento da fertilidade do solo e redução da dependência de fertilizantes químicos (GONÇALVES et al., 2023).

Estudos realizados utilizando nanopartículas de carbono (*Carbon dots* ou C-dots) revelaram que essas estruturas são capazes de penetrar nos tecidos vegetais, inclusive no núcleo das células, induzindo alterações na expressão gênica e também na atividade enzimática, além de promover o crescimento e a resistência a doenças em plantas de arroz (LI et al., 2018). Os C-dots também foram associados à melhora na tolerância ao estresse salino, ao aumento na produção de clorofila e ao acúmulo de carboidratos em plântulas de *Arabidopsis thaliana* (JING et al., 2023). Além disso, estudos mostram que a aplicação de C-dots pode aumentar a tolerância aos estresses causados por calor em plantas, diminuindo os danos oxidativos e preservando a eficiência fotossintética (ZHONG et al., 2023).

Diante dos avanços relacionados ao uso de bioinsumos nanoestruturados, produtos à base de carbono têm sido aplicados com o intuito de promover o crescimento e aumentar a tolerância ao estresse térmico em arroz irrigado (HUANG et al., 2021). Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de C-dots de *Spirulina* ou *Arbolina* (produto comercial) em plantas de arroz, em condições normais e sob estresse térmico por calor, a fim de investigar como esses bioestimulantes influenciam o desenvolvimento e impactam na produtividade das plantas.

2. METODOLOGIA

O experimento foi realizado na área experimental Centro Agropecuário da Palma, que pertence à Universidade Federal de Pelotas e está localizado no município de Capão do Leão/RS, entre os meses de outubro de 2024 e março de 2025.

As plantas de arroz foram cultivadas a campo utilizando a cultivar IRGA 424 RI, que apresenta um ciclo médio de desenvolvimento (PAES, 2024). O plantio foi realizado com uma densidade de 300 plantas por m², utilizando os espaçamentos e o manejo convencional recomendado pelo IRGA (2019).

As nanopartículas foram aplicadas via pulverização foliar utilizando aspersor costal na dose de 0,2 mg/mL para ambos os C-dots até o ponto de molhamento. O delineamento experimental consistiu em 6 tratamentos: 1) Controle; 2) C-dots de Spirulina (Spi); 3) C-dots de Arbolina (Arb); 4) Estresse Térmico por Calor (ETC); 5) Spirulina + ETC; 6) Arbolina + ETC, com quatro repetições independentes para cada tratamento. Para os tratamentos que receberam o estresse térmico, foram construídas pequenas estufas medindo 3,5 m × 1,5 m para manter o controle de temperatura (Figura 1 a). A montagem e implementação das estruturas foi realizada no estádio R₄ e mantida por 15 dias. Após, foram retiradas e as plantas foram mantidas até o final do ciclo para coleta e avaliação da produtividade e qualidade de grãos (Figura 1 b).

A colheita das panículas foi realizada manualmente, com o auxílio de foices e utilizando bastão de 1 m para delimitar a área de coleta. Para realizar a avaliação da produtividade de grãos por planta, foram selecionadas 20 panículas de cada repetição, totalizando 80 panículas por tratamento. Em seguida foi feita a contagem dos grãos cheios e vazios de cada panícula, o que permitiu a análise comparativa do desempenho de produção das plantas em cada uma das condições expostas. O peso de mil grãos (PMG) também foi avaliado. Além disso, foram realizadas análises de qualidade de engenho, produtividade e qualidade de grãos (proteínas, lipídios, fibras e amido), utilizando a técnica de espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS).

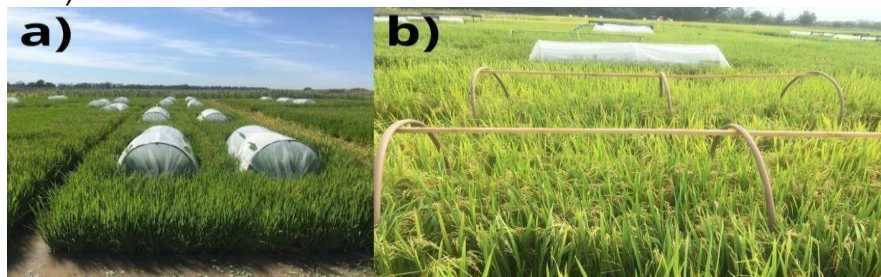


Figura 1 - (a) Estufas utilizadas para manter o estresse térmico; (b) Plantas após a retirada das estufas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do rendimento de grãos inteiros (Tabela 1) mostrou que houve um aumento de 15% e 13% em relação ao grupo controle, quando as plantas foram tratadas com ambos os C-dots, em condições normais. Quando as plantas foram submetidas ao ETC, houve um aumento de 11% e 12% no rendimento dos grãos nos tratamentos com ambos C-dots. Esse resultado sugere que os C-dots foram capazes de manter a qualidade física dos grãos mesmo sob estresse térmico. Curiosamente, o grupo ETC manteve a integridade dos grãos, o que não foi observado para os tratamentos com ambos os C-dots em condição de estresse, pois apresentaram os maiores percentuais de grãos quebrados (135% e 131%)

quando comparados ao grupo com estresse. Já em condição normal, não houve diferença estatística entre o grupo controle e ambos os tratamentos com C-dots.

Quanto à esterilidade de espiguetas, houve um aumento de 28% na esterilidade das plantas tratadas com Arbolina, quando comparadas ao grupo controle. Quando as plantas foram tratadas com C-dots de Spirulina, houve uma redução de 27% na esterilidade das espiguetas quando comparada ao grupo ETC sem aplicação de C-dots. A produtividade das plantas tratadas com ambos os C-dots também foi mantida, mesmo em condições de estresse, com um aumento de 35% e 34%, respectivamente. Não houve diferença quando as plantas foram mantidas em condições normais. Esses dados podem indicar um possível efeito protetivo das plantas tratadas com C-dots, principalmente os de Spirulina, mesmo quando as plantas são submetidas ao ETC. Apesar de um aumento nos outros parâmetros de rendimento, não houve diferença estatística para o PMG (Tabela 1).

Tabela 1 - Mapa de calor exibindo o rendimento dos grãos inteiros (%), rendimento dos grãos quebrados (%), peso de mil grãos (PMG) (g), produtividade (Kg/ha) e esterilidade de espiguetas (%) de plantas de arroz cultivadas a campo e tratadas com diferentes C-dots, submetidas ou não à estresse térmico por altas temperaturas.

Variáveis	Sem Estresse				Com Estresse	
	Controle	Spi	Arb	ETC	Spi + ETC	Arb +ETC
Rendimento grãos inteiros (%)	57,65 ± 1,30 b	66,38 ± 1,57 a	65,16 ± 1,96 a	58,10 ± 0,10 b	64,71 ± 2,26 a	65,27 ± 1,75 a
Rendimento grãos quebrados (%)	3,86 ± 0,56 a	3,24 ± 0,54 a	3,66 ± 0,73 a	2,26 ± 0,38 b	5,33 ± 1,08 a	5,23 ± 0,77 a
Peso de mil grãos (PMG) (g)	26,12 ± 0,58 a	26,11 ± 0,32 a	25,99 ± 0,31 a	25,48 ± 0,15 a	25,61 ± 0,65 a	25,33 ± 0,66 a
Produtividade (Kg/ha)	11,365,87 ± 647,37 a	11,365,08 ± 611,10 a	11,516,00 ± 719,86 a	8,239,90 ± 1,392,31 b	11,085,09 ± 381,65 a	11,064,87 ± 708,14 a
Esterilidade de espiguetas (%)	18,19 ± 0,53 b	16,00 ± 1,00 b	23,33 ± 2,89 a	32,67 ± 2,52 a	23,00 ± 4,58 b	26,33 ± 4,04 ab

Os grupos foram divididos entre as condições sem estresse e com estresse e analisados quanto à normalidade. As médias e o desvio padrão, seguidos por letras diferentes em cada linha, diferem estatisticamente segundo o teste de Tukey ($p < 0,05$) para dados paramétricos, e segundo o teste Pair-wise ($p < 0,05$) para dados não paramétricos. As cores do mapa de calor foram calculadas por linha, através dos valores mais altos (vermelho), valores médios (amarelo) e valor mais baixos (verde).

As análises feitas para avaliação da qualidade nutricional (Tabela 2) revelaram que os tratamentos com ambos os C-dots elevaram de forma significativa a quantidade de proteínas, lipídios e amido nas plantas tratadas, em ambas as condições de cultivo. No entanto, os tratamentos Controle e ETC exibiram teores superiores de fibras e cinzas, que são componentes associados a uma qualidade tecnológica inferior do grão.

Tabela 2 - Mapa de calor exibindo a composição e qualidade pós-colheita de grãos de plantas de arroz cultivado a campo e tratado com diferentes C-dots, submetidas ou não à estresse térmico por altas temperaturas.

Variáveis	Sem Estresse				Com Estresse	
	Controle	Spi	Arb	ETC	Spi	Arb
Proteínas (%)	5,33 ± 0,09 b	6,48 ± 0,14 a	6,52 ± 0,28 a	5,96 ± 0,56 b	7,93 ± 0,92 a	7,33 ± 0,33 a
Umidade (%)	16,01 ± 0,37 a	12,29 ± 0,10 ab	11,97 ± 0,11 b	15,02 ± 0,70 a	12,4 ± 0,15 ab	12,22 ± 0,11 b
Lipídios (%)	0,49 ± 0,14 b	2,07 ± 0,08 a	2,04 ± 0,05 a	0,69 ± 0,23 b	2,09 ± 0,10 a	2,12 ± 0,06 a
Fibras (%)	5,86 ± 0,56 a	2,10 ± 0,01 b	2,10 ± 0,01 b	6,09 ± 0,32 a	2,09 ± 0,01 b	2,09 ± 0,02 b
Cinzas (%)	3,28 ± 0,06 a	1,03 ± 0,02 ab	0,98 ± 0,01 b	3,26 ± 0,14 a	1,07 ± 0,06 ab	1,01 ± 0,01 b
Amido (%)	59,05 ± 0,56 b	73,68 ± 0,31 a	73,81 ± 0,33 a	59,54 ± 0,17 b	72,70 ± 0,90 a	73,28 ± 0,38 a

Os grupos foram divididos entre as condições sem estresse e com estresse e analisados quanto à normalidade. As médias e o desvio padrão, seguidos por letras diferentes em cada linha, diferem estatisticamente segundo o teste de Tukey ($p < 0,05$) para dados paramétricos, e segundo o teste Pair-wise ($p < 0,05$) para dados não paramétricos. As cores do mapa de calor foram calculadas por linha, através dos valores mais altos (vermelho), valores médios (amarelo) e valores mais baixos (verde).

Os resultados obtidos indicam que a aplicação das nanopartículas de carbono (C-dots) não apenas diminuíram as perdas produtivas, mas também melhoraram a qualidade nutricional dos grãos de arroz, mesmo sob condições de estresse térmico.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra o potencial dos bioestimulantes nanoestruturados como uma estratégia para a otimização da qualidade e desempenho de produção de arroz cultivadas a campo, mesmo sob condições de estresse térmico. O estudo destacou como diferentes C-dots podem atuar de maneiras específicas sobre o metabolismo das plantas de arroz. Dessa forma, esses resultados oferecem novos *insights* para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis e que estão direcionadas à melhoria da produtividade e qualidade nutricional dos grãos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GONÇALVES, J.; FREITAS, J.; FERNANDES, I.; SILVA, P. Microalgae as Biofertilizers: A Sustainable Way to Improve Soil Fertility and Plant Growth. **Sustainability**, v. 15, n. 12413, p. 1-19, 2023.
- HUANG, M.; YIN, X.; CHEN, J.; CAO, F. Biochar application mitigates the effect of heat stress on rice (*Oryza sativa* L.) by regulating the root-zone environment. **Frontiers in Plant Science**, Changsha, v. 12, n. 711725, 2021.
- JING, X.; *et al.* Nitrogen-doped carbon dots enhanced seedling growth and salt tolerance with distinct requirements of excitation light. **RSC Advances**, v. 13, p. 12114–12122, 2023.
- LI, H.; *et al.* Impacts of Carbon Dots on Rice Plants: Boosting the Growth and Improving the Disease Resistance. **ACS Applied Bio Materials**, v. 1, p. 663–672, 2018.
- PAES, G. **Cultivar Irga 424 RI é a mais semeada no RS**. Destaque Rural, 14 nov. 2024. Online. Acesso em: 30 jul. 2025. Disponível em: <<https://destaquerural.com.br/agricultura/arroz/cultivar-irga-424-ri-e-a-mais-semeada-no-rs/>>.
- SHEDEED, Z. A.; *et al.* Spirulina platensis Biofertilization for Enhancing Growth, Photosynthetic Capacity and Yield of Lupinus luteus. **Agriculture**, v. 12, n. 781, p. 1-15, 2022.
- SOSBAI. **Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil**. 33 ed. Restinga Seca - RS. 2022.
- ZHONG, M.; *et al.* Spermidine carbon dots enhance thermotolerance by modulating photosynthesis and cellular redox homeostasis in tomato. **Environmental Science: Nano**, v. 10, p. 595-610, 2023.