

IMPACTO DA APLICAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE CARBONO DERIVADAS DE CIANOBACTÉRIAS EM PROCESSOS METABÓLICOS DE PLANTAS DE ARROZ CULTIVADAS A CAMPO

Luana Vanessa Peretti Minello¹; Shaiane Lessa dos Santos²; Luana Bueno Longaray³; Natan Fagundes⁴; Sidnei Deuner⁵; Aline Nunes⁶; Marcelo Maraschin⁷; Raul Antonio Sperotto⁸

Palavras-chave: mudanças climáticas; nanopartículas; produtividade; cianobactérias; microalgas.

Introdução

A crescente demanda por alimentos e as oscilações climáticas apresentam desafios significativos à agricultura, necessitando da adoção de tecnologias inovadoras para aumentar a produtividade e qualidade dos grãos de forma sustentável (Saud et al., 2022). As nanopartículas de carbono (C-dots) têm se destacado por seu potencial em melhorar o desempenho fisiológico e bioquímico das plantas (Shah et al., 2024). Estes estudos indicam que os C-dots podem modular processos metabólicos, influenciando crescimento, resistência ao estresse e qualidade dos grãos (Yang et al., 2022; Lu et al., 2025).

O arroz (*Oryza sativa*) é um cereal fundamental para a segurança alimentar global, representando cerca de 20% das calorias consumidas (Guo et al., 2021; Fukagawa & Ziska, 2019). No entanto, as variações climáticas afetam negativamente sua produtividade e a qualidade dos grãos (Siddik et al., 2019). Estratégias para mitigar esses impactos são essenciais (Saud et al., 2022). Nesse cenário, a aplicação de bioestimulantes nanoestruturados surge como uma alternativa promissora para aumentar a resiliência das plantas (Juárez-Maldonado et al., 2019; Shah et al., 2024).

Estudos iniciais sugerem que os C-dots atuam como bioestimulantes, influenciando processos fotossintéticos e a absorção de nutrientes (Li et al., 2020a). Sua aplicação pode impactar características fisiológicas, como condutância estomática e acúmulo de compostos antioxidantes (Guirguis et al., 2023; Li et al., 2023b). Para validar esses benefícios, é crucial realizar experimentos em condições reais de cultivo. Portanto, este estudo teve como objetivo investigar os efeitos da aplicação de C-dots sintetizados a partir de biomassa de *Spirulina* (cianobactéria) (S-CDs) no metabolismo de plantas de arroz, com foco em aspectos fisiológicos, bioquímicos e pós-colheita, visando contribuir para a melhoria da produtividade agrícola em cenários de crise climática.

Material e Métodos

Delineamento Experimental De Campo e Análises Bioquímicas

¹Bióloga, Mestra em Biotecnologia e Doutoranda em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, Campus do Capão do Leão, RS S/NC-EP 96160-00, lvminello@gmail.com

²Graduanda em Biologia, Universidade Federal de Pelotas, shaianelessadossantos44@gmail.com

³Eng^a. Agrônoma, Mestranda em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, buenolongaray@gmail.com

⁴Eng. Agrônomo, Mestrando em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, natanfagundes@gmail.com

⁵Eng. Agrônomo, Doutor em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas. sdeuner@yahoo.com.br

⁶Bióloga, Doutora em Biotecnologia e Biociências. Universidade Estadual Paulista e Universidade Federal de Santa Catarina. alinenunes_bio@hotmail.com

⁷Eng. Agrônomo, Doutor em Bioquímica. Universidade Federal de Santa Catarina. mtocsy@gmail.com

⁸Biólogo, Doutor em Biologia Celular e Molecular. Universidade Federal de Pelotas. raulsperotto@gmail.com

A primeira safra foi realizada entre outubro de 2023 e março de 2024, no Centro Agropecuário da Palma (Universidade Federal de Pelotas, Capão do Leão, RS). O solo, um Planossolo Háplico carbonático, foi analisado nas profundidades de 0–20 cm antes do experimento. Este foi conduzido em blocos casualizados com 6 repetições, utilizando a cultivar IRGA 424 RI, conhecida por sua alta produtividade e adaptabilidade. A densidade de semeadura foi de 300 plantas por m², equivalente a 120 kg de sementes por hectare, com espaçamento de 0,35 m, seguindo as recomendações da SOSBAI (2023). As nanopartículas de carbono (S-CDs) foram aplicadas por aspersão foliar em três estádios de desenvolvimento (V₄, R₀ e R₄), com uma vazão de 200 L ha⁻¹. O produto comercial Arbolina foi aplicado como controle positivo. Após 24 horas das aplicações, foram coletadas amostras de folhas de 5 plantas por repetição, que foram congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas a -80°C para análises posteriores. A colheita das sementes ocorreu manualmente quando 90% das panículas estavam maduras, apresentando a coloração típica da cultivar. Para as análises bioquímicas, as amostras liofilizadas foram avaliadas quanto à capacidade antioxidante por DPPH (Yamaguchi et al., 1998), e quanto aos conteúdos totais de fenólicos (Singleton et al., 1999), flavonoides (Woisky & Salatino, 1998), carotenoides (Aman et al., 2005), açúcares solúveis e amido (Umbreit & Burris, 1964), carboidratos (DuBois et al., 1956), proteínas (Bradford, 1976) e aminoácidos (Silveira & Furlong, 2007).

Resultados e Discussão

Houve um aumento de 20% e 18% nos teores de fenólicos totais e flavonoides, respectivamente, em plantas tratadas com S-CDs quando comparadas ao grupo controle no estágio R₀ (**Fig. 1b e 1c**). Os dados sugerem que os C-dots de Spirulina podem ter influenciado um ajuste no metabolismo secundário das plantas no estágio R₀, pois não houveram diferenças significativas na atividade antioxidante e no teor de carotenoides (**Fig. 1a e 1d**). Esses compostos estão envolvidos em diversos processos fisiológicos, incluindo sinalização celular e adaptação a estresses ambientais (Mahajan et al., 2020).

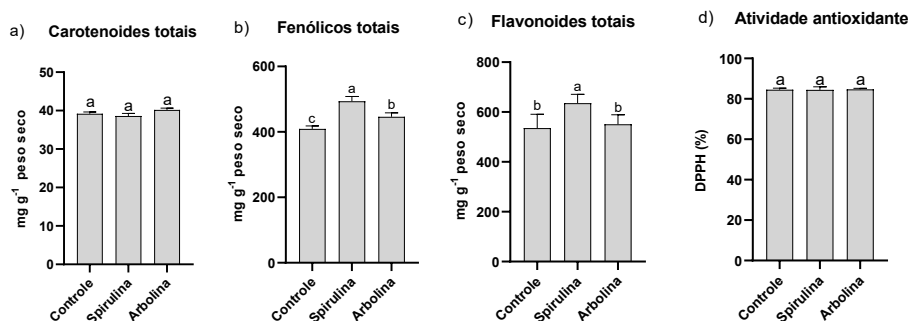


Figura 1. Efeitos da aplicação de nanopartículas de carbono no conteúdo total de carotenoides e antioxidantes não-enzimáticos em plantas de arroz (*Oryza sativa*), cultivar 424RI, tratadas com 0,2 mg mL⁻¹ de Spirulina ou Arbolina. Os valores são expressos pelas médias (mg/g de peso seco) e DP de cinco repetições biológicas independentes. Diferenças estatisticamente significativas (teste de Tukey, $p < 0,05$) são marcadas por diferentes letras minúsculas. Teor de carotenoides (a), Conteúdo de fenólicos totais (b), Conteúdo de flavonoides totais (c), Atividade antioxidante DPPH: 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (d).

¹Bióloga, Mestra em Biotecnologia e Doutoranda em Fisiologia Vegetal, Universidade federal de Pelotas, Campus do Capão do Leão, RS S/NC-EP 96160-00, lvminello@gmail.com

²Graduanda em Biologia, Universidade Federal de Pelotas, shaianelessadossantos44@gmail.com

³Eng^a. Agrônoma, Mestranda em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, buenolongaray@gmail.com

⁴Eng. Agrônomo, Mestrando em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, natanfagundes@gmail.com

⁵Eng. Agrônomo, Doutor em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas. sdeuner@yahoo.com.br

⁶Bióloga, Doutora em Biotecnologia e Biociências. Universidade Estadual Paulista e Universidade Federal de Santa Catarina. alinenunes_bio@hotmail.com

⁷Eng. Agrônomo, Doutor em Bioquímica. Universidade Federal de Santa Catarina. mtocsy@gmail.com

⁸Biólogo, Doutor em Biologia Celular e Molecular. Universidade Federal de Pelotas. raulspierotto@gmail.com

Quanto ao metabolismo primário, houve um aumento no teor de amido de 40% e 19%, respectivamente, em ambos os tratamentos com C-dots (**Fig. 2b**), seguido de um aumento de 28% no teor de carboidratos e de 33% no teor de aminoácidos, para o tratamento que recebeu os C-dots de Arbolina (**Fig. 2c e 2e**). Não houveram diferenças significativas quanto aos demais parâmetros avaliados quando comparados ao grupo controle.

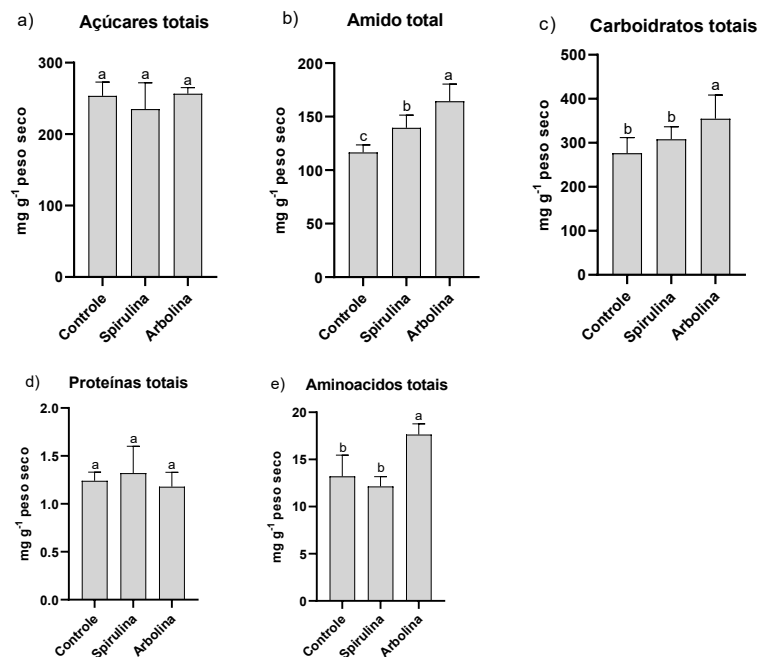


Figura 2. Efeitos da aplicação por aspersão de nanopartículas de carbono no metabolismo de carboidratos e proteínas de plantas de arroz (*Oryza sativa*), cultivar 424RI, tratadas com 0,2 mg mL⁻¹ de Spirulina ou Arbolina. Teor de açúcares solúveis totais (**a**), Teor de amido total (**b**), Teor de carboidratos totais (**c**), Teor de proteínas totais (**d**) e Teor de aminoácidos totais (**e**). Os valores são expressos pelas médias (mg/g de peso seco) e DP de cinco repetições biológicas independentes. Diferenças estatisticamente significativas (teste de Tukey, $p < 0,05$) são marcadas por diferentes letras minúsculas.

Os dados indicam que o tratamento com ambos os C-dots melhora tanto o metabolismo primário quanto o secundário das plantas. O aumento no teor de amido, carboidratos e aminoácidos sugere uma melhor capacidade de armazenamento de energia (Méndez-Espinoza et al., 2021), enquanto o aumento nos fenólicos totais e flavonoides com os S-CDs pode indicar uma maior resistência ao estresse (Mahajan et al., 2020). A falta de diferenças significativas em outros parâmetros em relação ao controle sugere que os efeitos podem variar conforme o tipo de nanopartícula.

Conclusões

¹Bióloga, Mestra em Biotecnologia e Doutoranda em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, Campus do Capão do Leão, RS S/NC-EP 96160-00, lvminello@gmail.com

²Graduanda em Biologia, Universidade Federal de Pelotas, shaianelessadossantos44@gmail.com

³Eng^a. Agrônoma, Mestranda em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, buenolongaray@gmail.com

⁴Eng. Agrônomo, Mestrando em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, natanfagundes@gmail.com

⁵Eng. Agrônomo, Doutor em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas. sdeuner@yahoo.com.br

⁶Bióloga, Doutora em Biotecnologia e Biociências. Universidade Estadual Paulista e Universidade Federal de Santa Catarina. alinenunes_bio@hotmail.com

⁷Eng. Agrônomo, Doutor em Bioquímica. Universidade Federal de Santa Catarina. mtocsy@gmail.com

⁸Biólogo, Doutor em Biologia Celular e Molecular. Universidade Federal de Pelotas. raulsperto@gmail.com

Esses resultados preliminares sugerem que mais estudos de campo adicionais são necessários para validar o uso de C-dots como uma ferramenta para aumentar a produtividade e a resiliência das culturas, especialmente em condições adversas decorrentes das mudanças climáticas. O período de colheita foi afetado pelo excesso de chuvas no estado, tornando os resultados pouco conclusivos. Nova safra (24/25) já está em andamento para validação dos resultados de colheita e pós-colheita observados.

Referências

- FUKAGAWA, N. K.; ZISKA, L. H. Rice: importance for global nutrition. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, v. 65, p. S2–S3, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3177/jnsv.65.S2>.
- GUIRGUIS, A. et al. Boosting plant photosynthesis with carbon dots: a critical review of performance and prospects. *Small*, v. 19, n. 43, p. 2300671, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.202300671>.
- JUÁREZ-MALDONADO, A. et al. Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 20, n. 1, p. 162, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>.
- LI, Y. et al. A review on the effects of carbon dots in plant systems. *Materials Chemistry Frontiers*, v. 4, n. 2, p. 437–448, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9QM00614A>.
- LU, Z. et al. Multi-activity ferruginated carbon quantum dots nanozyme improves wheat seedling growth and Cd tolerance. *The Crop Journal*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2025.01.016>.
- MAHAJAN, M.; KUIRY, R.; PAL, P. K. Understanding the consequence of environmental stress for accumulation of secondary metabolites in medicinal and aromatic plants. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, v. 18, p. 100255, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100255>.
- MÉNDEZ-ESPINOZA, A. M. et al. Carbohydrate and amino acid dynamics during grain growth in four temperate cereals under well-watered and water-limited regimes. *Agronomy*, v. 11, n. 8, p. 1516, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11081516>.
- SAUD, S. et al. Comprehensive impacts of climate change on rice production and adaptive strategies in China. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, p. 926059, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.926059>.
- SHAH, M. A. et al. Application of nanotechnology in the agricultural and food processing industries: a review. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 39, e00809, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00809>.
- SIDDIK, M. A. et al. Responses of indica rice yield and quality to extreme high and low temperatures during the reproductive period. *European Journal of Agronomy*, v. 106, p. 30–38, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.03.004>.
- SOSBAI (Org.). *Recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil: XXXIII reunião técnica da cultura do arroz irrigado*. 33. ed. Sosbai, 2023.
- YANG, H. et al. Foliar carbon dot amendment modulates carbohydrate metabolism, rhizospheric properties and drought tolerance in maize seedling. *Science of The Total Environment*, v. 809, 151105, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151105>.

¹Bióloga, Mestra em Biotecnologia e Doutoranda em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, Campus do Capão do Leão, RS S/NC-EP 96160-00, lvminello@gmail.com

²Graduanda em Biologia, Universidade Federal de Pelotas, shaianelessadossantos44@gmail.com

³Eng^a. Agrônoma, Mestranda em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, buenolongaray@gmail.com

⁴Eng. Agrônomo, Mestrando em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, natanfagundes@gmail.com

⁵Eng. Agrônomo, Doutor em Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas. sdeuner@yahoo.com.br

⁶Bióloga, Doutora em Biotecnologia e Biociências. Universidade Estadual Paulista e Universidade Federal de Santa Catarina. alinenunes_bio@hotmail.com

⁷Eng. Agrônomo, Doutor em Bioquímica. Universidade Federal de Santa Catarina. mtocsy@gmail.com

⁸Biólogo, Doutor em Biologia Celular e Molecular. Universidade Federal de Pelotas. raulspierotto@gmail.com